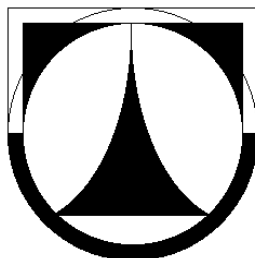


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



Bc. PATRIK BULÍŘ

Optimalizace výkonu vytápěcí jednotky SAHARA

Power optimizing of unit heater SAHARA

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran: 67

Počet tabulek: 6

Počet obrázků: 41

Počet příloh: 4

Liberec 2013

Optimalizace výkonu vytápěcí jednotky SAHARA

A n o t a c e

Diplomová práce se zabývá optimalizací výkonu vytápěcí jednotky s obchodním názvem Sahara. V teoretické části práce je popsána problematika přenosu tepla vedením a prouděním, vedení tepla složenou stěnou a žebrovanou stěnou, měření teploty a popis vytápěcích jednotek. V praktické části práce je popsána konstrukce a výroba polohovacího zařízení, měření teplot a rychlostí proudícího vzduchu a jsou provedeny numerické simulace proudění vzduchu ve stávajícím výměníku typu voda/vzduch. Dále je zde proveden návrh optimalizace teplosměnných ploch výměníku typu voda/vzduch a numerické simulace proudění kolem těchto ploch.

K l í ě o v á s l o v a

Sdílení tepla, výměník tepla, polohovací zařízení, numerické simulace, lamela, obtékání profilované stěny

Power optimizing of unit heater SAHARA

A n n o t a t i o n

This thesis deals with the power optimizing of unit heater with trade name Sahara. In the theoretical part of thesis are described problems about convection and conduction heat transfer, heat conduction of combined wall and ribbed wall, measuring of temperature, description of heater units and numeric simulation of air flow in existing heat exchanger type water/air. In the practical part of thesis is described design and manufacturing of positioned apparatus for measuring of temperature and velocity of air stream. Further there is the advance of optimized heat transfer surface in heat exchanger type water/air and numeric simulations of air flow around optimized surfaces.

K e y w o r d s

Heat transfer, heat exchanger, positioning apparatus, numeric simulation, lamella, circumfluence of the profiled wall

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Bc. Patrik Bulíř**

Studijní program **N2301 Strojní inženýrství**

Obor **2302T010 Konstrukce strojů a zařízení**

Zaměření **Tepelná technika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Optimalizace výkonu vytápěcí jednotky SAHARA

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Rešerše stávajícího stavu poznání.
2. Příprava experimentů a měření výkonových charakteristik stávající jednotky SAHARA.
3. Numerická simulace proudění vzduchu ve výměníku tepla voda-vzduch.
4. Návrh optimalizované teplosměnné plochy. Numerická simulace proudění kolem optimalizované teplosměnné plochy.
5. Porovnání výsledků a jejich analýza.



Forma zpracování diplomové práce:

- původní zpráva: cca 50 stran
- grafické práce: 5 (schémata zapojení, dokumentace experimentů, výsledky experimentů)

Seznam odborné doporučené literatury:

- [1] Lienhard, J.H., Lienhard, J.H.: A Heat Transfer Textbook, Phlogiston Press, MIT, 2005
- [2] Jenčík, J., Volf, J.: Technika měření. Skripta ČVUT Praha, 2003
- [3] Chyský, J., Hemzal, K. a kol.: Větrání a klimatizace, Brno: Bolit-B Press, 1993

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 21.3.2013

P r o h l á š e n í

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 19. května 2013

Podpis:.....

D e c l a r a t i o n

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis of grant a license for its use. I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and the basis of consultation with the head of thesis and a consultant.

Date: 19th May 2013

Signature:.....

P o d ě k o v á n í

Rád bych zde poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D., a konzultantce práce Ing. Petře Dančové, Ph.D, za jejich odborné vedení, mnoho cenných rad a připomínek, i za jejich vstřícný přístup a trpělivost při vzniku této práce.

Poděkování patří i kolegům v zaměstnání, za jejich vstřícnost a ohledy při skloubení pracovních a studijních povinností, a též za poskytnutí technického zázemí pro vznik této práce.

Též bych zde chtěl velmi poděkovat své přítelkyni za její lásku, podporu, obětavost a trpělivost, kterými mi velmi pomáhala zvládnout všechny studijní povinnosti během celého vysokoškolského studia.

Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1	ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA.....	13
2.1.1	VEDENÍ TEPLA	13
2.1.1.1	Fourierův zákon.....	13
2.1.1.2	Vedení tepla rovinnou a válcovou stěnou	14
2.1.1.3	Vedení tepla složenou stěnou.....	15
2.1.2	TEPELNÝ ODPOR.....	16
2.1.2.1	Přechodový odpor na styku dvou těles.....	16
2.1.3	PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM.....	17
2.1.3.1	Newtonův ochlazovací zákon.....	17
2.1.3.2	Součinitel přestupu tepla	17
2.1.4	PROSTUP TEPLA	18
2.1.4.1	Součinitel prostupu tepla.....	18
2.1.5	PŘENOS TEPLA ŽEBREM.....	19
2.1.5.1	Účinnost žebra.....	20
2.1.5.2	Efektivita žebra	21
2.1.6	ÚČINNOST VÝMĚNÍKU	21
2.2	PROUDĚNÍ TEKUTIN	22
2.2.1	DRUHY PROUDĚNÍ	22
2.2.2	ZTRÁTY PŘI PROUDĚNÍ POTRUBÍM.....	22
2.2.2.1	Třecí ztráty	22
2.2.2.2	Místní ztráty	23
2.2.2.3	Celkové ztráty	23
2.3	NUMERICKÉ SIMULACE	24
2.3.1	CFD PROGRAMY	24
2.3.2	ANSYS WORKBENCH	25
2.4	MĚŘENÍ RYCHLOSTI A TEPLoty	25
2.4.1	ANEMOMETR SE ŽHAVENÝM DRÁTKEM	25
2.4.1.1	Testo 425	25
2.4.2	TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TEPLoty (TERMOČLÁNKY).....	26

2.5 VYTÁPĚCÍ JEDNOTKA.....	27
2.5.1 LH	27
2.5.2 SAVANA	27
2.5.3 LEO	28
2.5.4 SAHARA	29
2.6 VÝMĚNÍKY VODA-VZDUCH	30
 <u>3 PRAKTICKÁ ČÁST.....</u>	 <u>31</u>
 3.1 CÍL.....	31
3.2 ÚKOLY	31
3.3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	31
3.4 POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	31
3.4.1 NÁVRH KONSTRUKCE	32
3.4.2 SOUČÁSTKY	32
3.4.3 SESTAVENÍ.....	35
3.5 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO A RYCHLOSTNÍHO PROFILU	38
3.5.1 VARIANTY VYTÁPĚCÍ JEDNOTKY	38
3.5.2 SESTAVENÍ A PŘÍPRAVA TOPNÉHO OKRUHU	38
3.5.3 NASTAVENÍ TEPLOTNÍHO SPÁDU	40
3.5.4 MĚŘENÍ RYCHLOSTÍ A TEPLOT PROUDÍCÍHO VZDUCHU	40
3.5.5 DOPLŇKOVÉ MĚŘENÍ RYCHLOSTÍ A TEPLOT PROUDÍCÍHO VZDUCHU	41
3.5.6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	42
3.5.7 VÝKONOVÁ POLE	43
3.6 NUMERICKÉ SIMULACE STÁVAJÍCÍHO VÝMĚNÍKU	44
3.6.1 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU	44
3.6.2 TVORBA VÝPOČTOVÉ SÍTĚ.....	45
3.6.3 STANOVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK.....	45
3.6.4 VÝPOČET	47
3.6.5 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ	47
3.7 NÁVRH OPTIMALIZOVANÉ TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY	48
3.7.1 VARIANTA A	48
3.7.2 VARIANTA B.....	49
3.7.3 VARIANTA C.....	50
3.8 NUMERICKÉ SIMULACE OPTIMALIZOVANÝCH VARIANT	51

3.8.1	VARIANTA A	51
3.8.2	VARIANTA B.....	51
3.8.3	VARIANTA C.....	52
3.9	TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ.....	54
3.9.1	TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY A	55
3.9.2	TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY B1	55
3.9.3	TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY B2	56
3.10	ÚČINNOST VÝMĚNÍKU	56
4	<u>DISKUSE VÝSLEDKŮ</u>	<u>58</u>
4.1	POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	58
4.2	RYCHLOSTNÍ A TEPLTNÍ PROFILY VZDUCHU	59
4.3	CHYBY MĚŘENÍ	60
4.4	NUMERICKÉ SIMULACE	61
5	<u>ZÁVĚR.....</u>	<u>64</u>
6	<u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u>	<u>66</u>
7	<u>SEZNAM PŘÍLOH.....</u>	<u>67</u>

Seznam použitých symbolů

A	[1]	optimalizovaná varianta
$B1$	[1]	optimalizovaná varianta
$B2$	[1]	optimalizovaná varianta
$C0$	[1]	optimalizovaná varianta
$C1$	[1]	optimalizovaná varianta
$C2$	[1]	optimalizovaná varianta
$C3$	[1]	optimalizovaná varianta
$C4$	[1]	optimalizovaná varianta
\dot{C}_1	[W·K ⁻¹]	tepelná kapacita teplejšího proudu
\dot{C}_2	[W·K ⁻¹]	tepelná kapacita chladnějšího proudu
c_p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	isobarická měrná tepelná kapacita
D	[m]	průměr trubky, válce
d	[m]	průměr trubky, válce
D_0	[m]	vnitřní průměr trubky
D_1	[m]	průměr na rozhraní trubky a žebra
D_2	[m]	vnější průměr trubky
h_r	[m]	délka žebra
k	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
L	[m]	délka, charakteristický rozměr
L_{TR}	[m]	délka válce, trubky
m	[m]	šířka mezery mezi žebry
\dot{m}_w	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok vody
n_K	[1]	počet kolínek
n_{TR}	[1]	počet trubek ve výměníku
n_{vc}	[1]	počet vodních cest ve výměníku
p_z	[Pa]	tlaková ztráta
p_{zt}	[Pa]	tlaková ztráta třením
p_{zm}	[Pa]	tlaková ztráta místní (vřazenými odpory)
\dot{Q}	[W]	tepelný tok, výkon výměníku
\dot{Q}_{max}	[W]	maximální tepelný tok, maximální teoretický výkon výměníku
\dot{Q}_{sr}	[W]	tepelný tok z žebrování do tekutiny

\dot{q}	[W·m ⁻²]	hustota tepelného toku
R	[K·m ² ·W ⁻¹]	tepelný odpor
r	[m]	poloměr
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha povrchu stěny
S_1	[m ²]	plocha povrchu bez žeber
S_2	[m ²]	plocha povrchu žebrování
S_r	[m ²]	plocha žeber
$S_{stř}$	[m ²]	střední plocha válcové stěny
s_1	[m]	vzdálenost trubek v řadě kolmá na směr obtékání
s_2	[m]	vzdálenost řad trubek ve svazku ve směru obtékání
T	[K]	teplota
t	[°C]	teplota
t_T	[°C]	teplota topných ploch
t_1	[°C]	teplota teplejšího proudu
t_2	[°C]	teplota studenějšího proudu
t_l'	[°C]	vstupní teplota vzduchu
t_l''	[°C]	výstupní teplota vzduchu
t_{ln}	[°C]	logaritmický teplotní spád
t_{r1}	[°C]	teplota u konce žebra
t_{r2}	[°C]	teplota u paty žebra
t_s	[°C]	teplota stěny
t_{s1}	[°C]	teplota teplejšího povrchu stěny
t_{s2}	[°C]	teplota chladnějšího povrchu stěny
t_{sr}	[°C]	střední teplota žeber
t_w'	[°C]	vstupní teplota vody
t_w''	[°C]	výstupní teplota vody
\dot{V}_w	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový průtok vody
w	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění tekutiny
x	[m]	prostorová souřadnice, šířka výměníku,
y	[m]	prostorová souřadnice, výška výměníku
z	[m]	prostorová souřadnice, hloubka výměníku

α	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
α_k	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
α_l	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla z žeber do vzduchu
α_m	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla povrchu mezi žebry
α_r	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na povrchu žebra
α_1	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na stěně bez žeber
α_2	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla na žebrované stěně
δ	$[\text{m}]$	tloušťka stěny
δ_r	$[\text{m}]$	tloušťka žebra
η	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}]$	dynamická viskozita
η_{sr}	$[1]$	účinnost žebrování
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
λ_L	$[1]$	odporový součinitel při laminárním proudění
λ_T	$[1]$	odporový součinitel při turbulentním proudění
ν	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
ν_w	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita vody
π	$[1]$	Ludolfovo číslo
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota
ρ_w	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota vody
Φ	$[1]$	účinnost výměníku
ψ	$[1]$	součinitel žebrování
Δ	$[1]$	rozdíl (přírůstek, úbytek) hodnot veličin

1 ÚVOD

Energie je nedílnou a nepostradatelnou součástí našeho života. I když je neviditelná, její toky ovlivňují vše okolo nás. Energie však obvykle není sama od sebe rozložena podle skutečné potřeby, ale téměř vždy je nutno ji transportovat, často i transformovat z jedné formy do jiné. V mnoha strojích a zařízeních okolo nás, které potřebuje ke svému každodennímu životu, energie teče různými směry, a při tom koná práci, pohání vozidla, či vytápí budovy. Primární energie se však až na výjimky stále získává především chemickými reakcemi přeměnou energie obsažené v palivu. Takto získaná energie je však vázána na produkty těchto reakcí, které bývají nevhodné pro další využití, jsou mnohdy zdraví škodlivé či přímo jedovaté. K dalšímu využití je tedy zapotřebí energii od těchto produktů oddělit, přenesením energie z nevhodného média do jiného, čistého a k danému účelu již lépe použitelného. K takovému přenosu energie v tepelné formě slouží zařízení nazývané výměník. Podle účelu, konstrukce či použitých pracovních médií existuje velké množství různých typů výměníků tepla.

Tato práce se zabývá optimalizací výkonu výměníku použitého ve vytápěcí jednotce SAHARA, konkrétně výměníku typu voda/vzduch, a to použitím numerických metod konečných prvků pomocí programů CFD.

Výměníky této konstrukce bývají velmi často použity ve všech podobných vytápěcích a klimatizačních zařízeních, kde slouží k ohřevu či chlazení vzduchu pro potřeby člověka nebo přítomných technologických zařízení. Slouží též i k úsporám energie pomocí různých zařízení se zpětným získáváním tepla z odpadních plynů či kapalin, čímž přispívají k úspoře primárních fosilních paliv, ke snižování emisí CO_2 i k ochraně životního prostředí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA

Přenosem (sdílením) tepla rozumíme předávání tepla z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě, viz druhý termodynamický zákon o entropii. Přenos tepla se uskutečňuje vedením, prouděním a sáláním. Skutečné děje však představují téměř vždy kombinaci dvou nebo všech těchto tří základních případů. [1 a 2]

2.1.1 Vedení tepla

Pouze vedením (kondukcí) se teplo šíří jen v tuhých tělesech, v tekutinách se šíří i prouděním v důsledku pohybu jejich částic při jejich rozdílné teplotě [2].

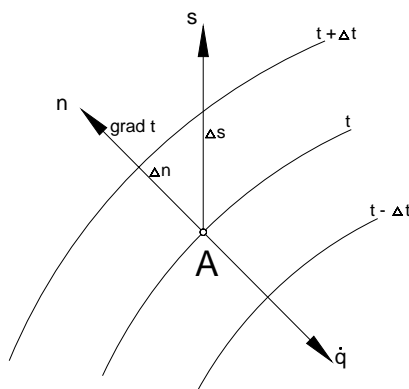
2.1.1.1 Fourierův zákon

Tok tepla přenášený vedením \dot{Q} je množství tepla, které projde plochou za jednotku času. Tok tepla jednotkou plochy je hustota tepelného toku. Vyjadřuje se pomocí *Fourierova zákona*

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.1)$$

kde

λ je součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].



Obr. 1 Izotermní plochy s vektory gradientu teplotního spádu a hustoty teplotního toku [2]

Teplo se šíří ve směru teplotního spádu, tj. v opačném směru než $\text{grad } t$, proto i když vektory $\text{grad } t$ a \dot{q} leží na stejné normále k izotermické ploše, mají vzájemně opačný směr, vyjadřujeme to záporným znaménkem (obr. 1). [2]

2.1.1.2 Vedení tepla rovinnou a válcovou stěnou

Pro rovinnou stěnu (obr. 2 vlevo) o tloušťce δ , s tepelnou vodivostí $\lambda = konst.$ a s povrchovými teplotami $t_{s1} > t_{s2}$ platí při okrajové podmínce $x = 0 \Rightarrow t_s = t_{s1}$ lineární rovnice teplotního pole ve tvaru

$$t_s = t_{s1} - \frac{\dot{q}}{\lambda} x \quad [^{\circ}C], \quad (2.2)$$

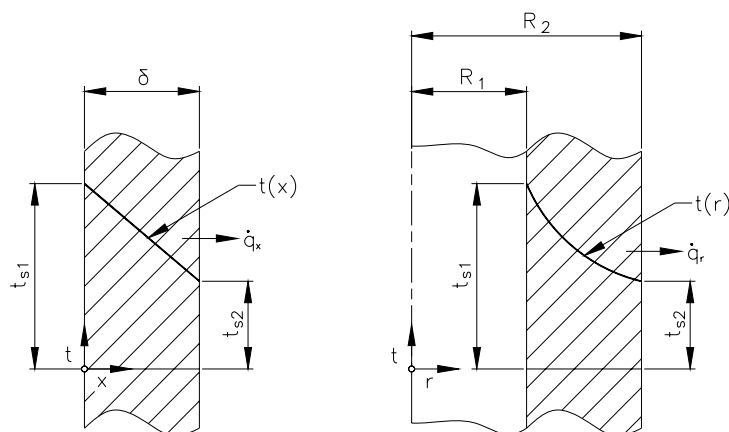
kde

\dot{q} je hustota tepelného toku stěnou daná vztahem

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) \quad [W \cdot m^{-2}]. \quad (2.3)$$

Tepelný tok celou plochou stěny S je

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) S \quad [W]. \quad (2.4)$$



Obr. 2 Průběh teplot při vedení tepla vlevo v rovinné stěně, vpravo ve válcové stěně (trubce) [3]

V případě válcové stěny (obr. 2 vpravo) tvoří izotermické plochy souosé válce o délce L , proto tepelný tok stěnou má směr radiální. Pro jednoduchou válcovou stěnu o tloušťce δ se vyjadřuje rovnicí

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot d \cdot L}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{D_2}{D_1}} (t_{s1} - t_{s2}) = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) S_{stř} \quad [W], \quad (2.5)$$

kde

$S_{stř}$ je logaritmická střední plocha válcové stěny

$$S_{stř} = \frac{\pi \cdot L (D_2 - D_1)}{\ln \frac{D_2}{D_1}} = \frac{S_2 - S_1}{\ln \frac{S_2}{S_1}} \quad [m^2]. \quad (2.6)$$

Střední plochu tenkostěnné válcové stěny (trubky) lze vyjádřit rovněž vztahem

$$S_{stř} = \frac{S_1 + S_2}{2} \quad [m^2]. \quad (2.7)$$

Lineární hustota tepelného toku se určí z rovnice

$$\dot{q}_l = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{\pi(t_{s1} - t_{s2})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{D_2}{D_1}} \quad [W \cdot m^{-1}]. \quad (2.8)$$

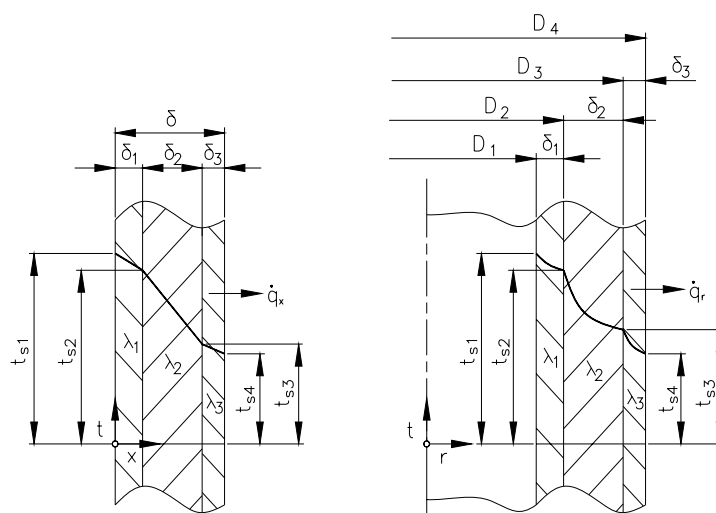
Při vedení tepla válcovou stěnou je závislost teploty na poloměru logaritmická

$$t_{s1} = t_{s2} - \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad [^\circ C]. \quad (2.9)$$

Předchozí odstavce čerpány z [2].

2.1.1.3 Vedení tepla složenou stěnou

Složená stěna (obr. 3) je tvořena několika vrstvami materiálů o různé vodivosti a různé tloušťce při stejné průtokové ploše [1].



Obr. 3 Vedení tepla složenou stěnou, vlevo rovinnou, vpravo válcovou [4]

Protože tepelný tok procházející všemi vrstvami stěny je stejný, musí platit

$$\dot{q}_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{s1} - t_{s2}) \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.10)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{s2} - t_{s3}) \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.11)$$

$$\dot{q}_3 = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_{s3} - t_{s4}) \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.12)$$

$$\dot{q} = \dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 \quad [W \cdot m^{-2}]. \quad (2.13)$$

Řešením těchto rovnic pak lze dojít ke vztahu

$$\dot{q} = \frac{t_{s1} - t_{s4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.14)$$

kterým je vyjádřena skutečnost, že celkový tepelný odpor složené stěny, je součtem tepelných odporů jednotlivých vrstev stěny. Čerpáno z [4].

2.1.2 Tepelný odpor

Převrácená hodnota poměru tepelné vodivosti a tloušťky stěny λ/δ vyjadřuje tepelný odpor stěny pro vedení tepla

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad [K \cdot m^2 \cdot W^{-1}]. \quad (2.15)$$

Čerpáno z [2].

2.1.2.1 Přejíhový odpor na styku dvou těles

Přenos tepla v tuhých tělesech je analogický s přenosem elektrického náboje v elektricky vodivých látkách, s aplikací pravidel pro sériové řazení elektrických odporů. Typickým případem výskytu sériového řazení termických odporů jsou složené stěny, které se vyskytují v konstrukcích tepelných zařízení, např. výměníků tepla, potrubí opatřená tepelnou izolací, nebo naopak potrubí zanesená provozními nánosy (vodní anebo kotelní kámen). V těchto případech přenosu tepla se předpokládá dokonalá spojitost teplotního profilu, zajištěná dokonalým fyzikálním stykem součástí. Tento předpoklad však ve skutečnosti není vždy splněn, velmi závisí na kvalitě povrchů styčných ploch, případně i na velikosti kontaktního tlaku. Všechny tyto termické odpory pak způsobují teplotní rozdíly na stykových plochách, které se musí při přesnějších výpočtech respektovat. [5]

Látkové složení korozních produktů bývá velmi různorodé, proto není možné přesně určit fyzikální vlastnosti těchto látek. Pro přibližnou představu lze vyjít z vlastností uměle vytvořených „korozních“ povrchů v podobě pasivací nebo eloxování, kde je látkové složení známo. V tab. 1 jsou uvedeny příklady hodnot termického odporu čistého hliníku a jeho eloxovaného povrchu při různých tloušťkách.

Tab. 1 Hodnoty termického odporu [6 a 7]

látka	součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tloušťka vrstvy δ [mm]		
		0,01	0,1	1
čistý hliník	245	$4,082 \cdot 10^{-5}$	$4,082 \cdot 10^{-4}$	$4,082 \cdot 10^{-3}$
elox hliníku (Al ₂ O ₃)	1,5	$6,67 \cdot 10^{-3}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$	0,667

2.1.3 Přenos tepla prouděním

Proudění neboli konvekce, je přenos tepla, ke kterému dochází v tekutinách. Předpokladem vzniku konvekce je makroskopický pohyb částic tekutiny v kombinaci s teplotním gradientem. Je to fyzikálně složitý děj, který závisí na řadě parametrů, např. rychlost proudění, teplota stěny, teplota tekutiny, geometrie teplosměnné plochy, charakter rychlostní a teplotní mezní vrstvy, vlastnosti tekutiny a další. Podle toho, zda je tento proces samovolný nebo uměle vyvolaný, rozlišujeme konvekci volnou a nucenou. [3]

2.1.3.1 Newtonův ochlazovací zákon

Hustota tepelného toku při přestupu tepla konvekcí se určuje z Newtonova vztahu

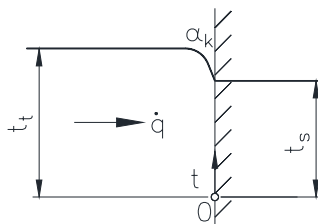
$$\dot{q} = \alpha_k(t_s - t_t) \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (2.16)$$

kde

α_k je součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

t_s je teplota stěny [$^{\circ}C$],

t_t je teplota tekutiny vně mezní vrstvy viz obr. 4 [$^{\circ}C$].



Obr. 4 Průběh teplot při přestupu tepla [4]

Pro tepelný tok platí

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = \alpha_k \cdot S(t_s - t_t) \quad [W], \quad (2.17)$$

kde

S je plocha povrchu, jímž tepelný tok prochází [m^2].

Předchozí odstavce čerpány z [3].

2.1.3.2 Součinitel přestupu tepla

Protože součinitel přestupu tepla α_k závisí na mnoha parametrech

$$\alpha_k = f(w, \lambda, \rho, c, \eta, \dots) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \quad (2.18)$$

kde

w je rychlost proudu tekutiny [$m \cdot s^{-1}$],

λ je tepelná vodivost tekutiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ je hustota tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

c je měrná tepelná kapacita tekutiny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

η je dynamická viskozita tekutiny [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$].

Nelze jej vyjádřit jedinou funkcí, která by platila pro všechny případy přenosu tepla konvekcí. Určuje se proto experimentálně, za pomoci teorie podobnosti, a výsledky experimentů (kritériální rovnice) lze aplikovat na jiné, geometricky podobné případy. [3]

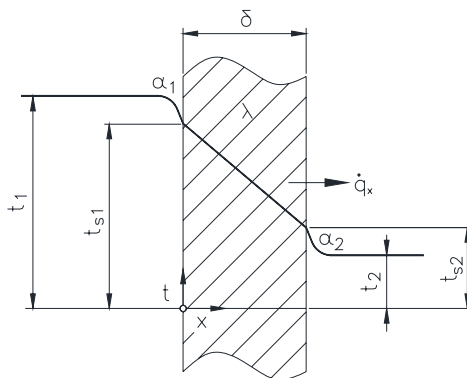
2.1.4 Prostup tepla

Prostup tepla je přenos tepla mezi tekutinami stěnou, která je odděluje. Prostup tepla tvoří tři jednotlivé procesy:

- Přestup tepla z ochlazované tekutiny na povrch stěny
- Vedení tepla z jednoho povrchu stěny na opačný
- Přestup tepla z opačného povrchu stěny do ohříváné tekutiny

2.1.4.1 Součinitel prostupu tepla

Při prostupu tepla rovinnou stěnou (obr. 5) o tepelné vodivosti λ jsou všechny plochy rovnoběžné s rovinou stěny izotermické.



Obr. 5 Průběh teplot při prostupu tepla jednoduchou stěnou [4]

Vztah pro tok tepla procházející stěnou je

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \overline{\Delta t}_{ln} \quad [\text{W}], \quad (2.19)$$

kde k je součinitel prostupu tepla, který se určuje ze vztahu

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}], \quad (2.20)$$

kde

S je plocha stěny [m^2],

δ je tloušťka stěny [m],

λ je tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

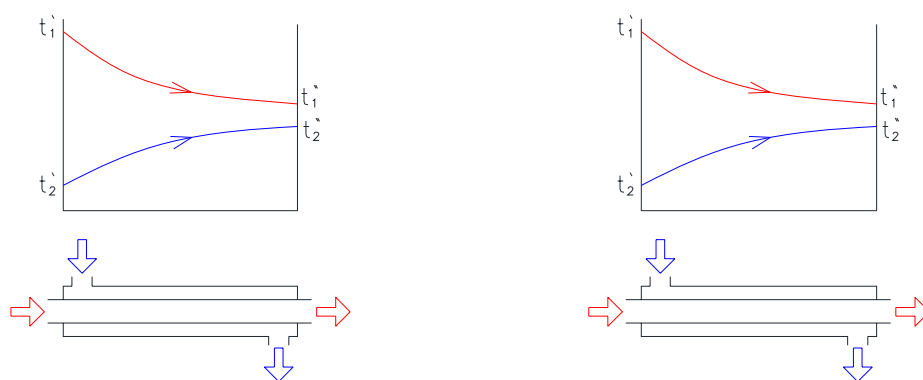
α_1 je součinitel přestupu tepla na jednom povrchu stěny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],

α_2 je součinitel přestupu tepla na druhém povrchu stěny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Střední logaritmický teplotní spád $\overline{\Delta t_{ln}}$ je dán vztahem

$$\overline{\Delta t_{ln}} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}} \quad [^{\circ}\text{C}], \quad (2.21)$$

kde jednotlivé teploty obou proudů tekutin jsou znázorněny na obr. 6.

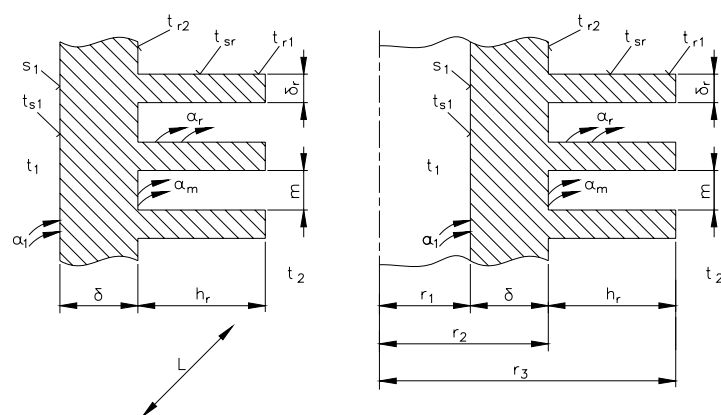


Obr. 6 Průběhy teplot u výměníků s uspořádáním, vlevo soproud, vpravo protiproud [1]

Předchozí odstavce čerpány z [3 a 5].

2.1.5 Přenos tepla žebrem

V případě, že se při přestupu tepla na obou stranách stěny řádově liší součinitele přestupu tepla, závisí součinitel prostupu tepla stěnou vždy na menší z obou hodnot přestupu tepla, a celkový přenos tepla je tak málo účinný.



Obr. 7 vlevo žebrovaná rovinná deska, vpravo žebrovaná trubka [3]

Jednou z možností, jak tuto účinnost zvýšit, je zvětšení kontaktního povrchu stěny s tekutinou na straně s malým součinitelem přestupu tepla. Toho lze dosáhnout *žebrováním* povrchu stěny. [3]

2.1.5.1 Účinnost žebra

Máme-li žebrovanou rovinou (obr. 7 vlevo) nebo válcovou stěnu (obr. 7 vpravo), pak teplota žeber je největší u jejich paty, a klesá se vzdáleností od stěny. Části žeber blíže ke stěně tak odvádějí více tepla do okolí než konce žeber. Poměr tepelného toku \dot{Q}_{sr} , který skutečně přestupuje z žeber do tekutiny, a toku $\dot{Q}_{sr\ max}$, který by přestupoval, kdyby teplota žeber byla na celém jejich povrchu stejná, nazýváme *účinnost žebrování*

$$\eta_{sr} = \frac{\dot{Q}_{sr}}{\dot{Q}_{sr\ max}} = \frac{\alpha_r \cdot S_r (t_{sr} - t_2)}{\alpha_r \cdot S_r (t_{r2} - t_2)} = \frac{t_{sr} - t_2}{t_{r2} - t_2} \quad [1], \quad (2.22)$$

kde

α_r je součinitel přestupu tepla povrchu žebra [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

S_r je povrch žeber [m^2],

t_{sr} je střední teplota žeber [$^{\circ}C$],

t_2 je teplota tekutiny v okolí žeber [$^{\circ}C$],

t_{r2} je teplota u paty žebra [$^{\circ}C$].

Celková plocha stěny s žebrováním S_2 , kterou dochází k přenosu tepla, se skládá z plochy žeber S_r a z plochy mezer mezi nimi S_m . Pokud součinitele přestupu tepla jsou $\alpha_1 \gg \alpha_2$, tepelný tok přestupující z žebrovaného povrchu je

$$\dot{Q}_{sr} = \alpha_2 \cdot S_2 (t_{r2} - t_2) \quad [W]. \quad (2.23)$$

Ekvivalentní součinitel přestupu tepla α_2 je dán ze vztahu

$$\alpha_2 = \alpha_m \cdot \eta_{sr} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \quad (2.24)$$

kde η_{sr} je účinnost žebrování, určovaná z rovnice

$$\eta_{sr} = 1 - \frac{S_r}{S_2} \left(1 - \eta_r \frac{\alpha_r}{\alpha_m} \right) \quad [1], \quad (2.25)$$

kde

α_m je součinitel přestupu tepla povrchu mezer [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Předchozí odstavce čerpány z [3].

2.1.5.2 Efektivita žebra

Prostup tepla rovinnou žebrovanou stěnou lze vyjádřit těmito rovnicemi

$$\dot{Q}_{sr} = k_1 \cdot S_1(t_1 - t_2) = \dot{q}_1 \cdot S_1 \quad [W], \quad (2.26)$$

$$\dot{Q}_{sr} = k_2 \cdot S_1(t_1 - t_2) = \dot{q}_2 \cdot S_2 \quad [W], \quad (2.27)$$

Součinitele prostupu tepla vztahující se k povrchům bez žebor S_1 a se žebry S_2

$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \psi} \right)^{-1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \quad (2.28)$$

$$k_2 = \left(\frac{\psi}{\alpha_1} + \frac{\delta \cdot \psi}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}], \quad (2.29)$$

kde

ψ je součinitel žebrování daný vztahem

$$\psi = \frac{S_2}{S_1} \quad [1]. \quad (2.30)$$

Odtud je vidět, že odpor proti přestupu tepla $1/\alpha_2$ se žebrováním povrchu zmenší na hodnotu $1/(\alpha_2 \cdot \psi)$, tedy ψ krát. Omezující podmínkou hodnoty ψ však je, že tepelný odpor $1/(\alpha_2 \cdot \psi)$ nesmí být menší než tepelný odpor $1/\alpha_1$. [3]

2.1.6 Účinnost výměníku

Protože vyhodnocování měření výměníků je kromě čistě souproutého a protiproutého uspořádání složité, byla pro výpočet výměníku zavedena rovnice

$$\dot{Q} = \dot{C}_1(t'_1 - t'_2)\Phi \quad [W], \quad (2.31)$$

kde

\dot{C}_1 je vždy menší z obou tepelných kapacit $[W \cdot K^{-1}]$,

Φ je provozní charakteristika výměníku, neboli *účinnost*, daná vztahem

$$\Phi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad [1], \quad (2.32)$$

kde \dot{Q}_{max} je maximální výkon výměníku, kterého by bylo možno dosáhnout, kdyby tekutina s menší tepelnou kapacitou \dot{C}_1 měla na výstupu z výměníku teplotu rovnou vstupní teplotě tekutiny s větší tepelnou kapacitou \dot{C}_2 . Tohoto teoretického maximálního výkonu by však mohl dosáhnout pouze výměník s nekonečně velkou přenosovou plochou, proto výkon reálných výměníků je vždy menší. Tato přenosová účinnost je definovaná vztahem

$$\Phi = \frac{\dot{Q}}{\dot{C}_1(t'_1 - t'_2)} \quad [1]. \quad (2.33)$$

Předchozí odstavce čerpány z [3].

2.2 PROUDĚNÍ TEKUTIN

2.2.1 Druhy proudění

Existují dva základní způsoby pohyb kapalin, a to laminární a turbulentní. Při laminárním proudění proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice kapaliny se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách, které se po sobě smýkají a které se vzájemně nepromíchávají. Naproti tomu turbulentní proudění je takové proudění vazké tekutiny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Tekutina koná při proudění kromě posouvání vůči kanálu i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Rychlost jednotlivých částic tekutiny se nepravidelně mění, tzn. proudění není stacionární. Rozhraní mezi oběma druhy proudění udává Reynoldsovo číslo, značené zkratkou Re . Je to bezrozměrné číslo, a jeho hodnota závisí na řadě parametrů, jako např. na geometrii proudu, na tlakovém spádu, atd. Pro laminární proudění v potrubí kruhového průřezu je horní mez asi $Re = 2300$. V intervalu $2300 > Re > 4000$ je přechodová oblast. Při hodnotách $Re > 4000$ je již plně vyvinuté turbulentní proudění. Reynoldsovo číslo se určí ze vztahu

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad [1], \quad (2.34)$$

kde

w je rychlost proudící kapaliny [1],

d je vnitřní průměr (charakteristický rozměr) potrubí [m],

ν je kinematická viskozita kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Rychlostní profil při proudění tekutin potrubím je nerovnoměrný. U stěny potrubí je rychlost nulová, naopak maxima dosahuje uprostřed proudu. Je to způsobeno viskozitou tekutiny, což je její schopnost přenášet tečná napětí. Čerpáno z [4].

2.2.2 Ztráty při proudění potrubím

Při proudění tekutiny potrubím se uplatňují dva druhy ztrát, a to třecí ztráty, a místní ztráty.

2.2.2.1 Třecí ztráty

Tyto ztráty vznikají při proudění kapalin v rovných úsecích potrubí, kde dochází k tření kapaliny o stěnu potrubí. Tlaková ztráta třením je pak vyjádřena vztahem

$$p_{zt} = \lambda \frac{L}{D} \varrho \frac{w^2}{2} \quad [Pa], \quad (2.35)$$

kde

λ je odporový součinitel [1],

L je délka přímého úseku potrubí [m],

D je vnitřní průměr potrubí [m],

ρ je hustota tekutiny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

w je střední rychlost tekutiny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Odporový součinitel λ závisí na druhu proudění. Pro laminární proudění ($Re < 2300$) lze hodnotu odporového součinitele určit ze vztahu

$$\lambda_L = \frac{64}{Re} \quad [1]. \quad (2.36)$$

Pro turbulentní proudění v hydraulicky hladkém potrubí lze hodnotu odporového součinitele určit ze vztahu

$$\lambda_T = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad [1]. \quad (2.37)$$

Předchozí odstavce čerpány z [4].

2.2.2.2 Místní ztráty

Tyto ztráty vznikají při porušení pravidelného rozvinutého proudění kapaliny při náhlé změně směru proudění, při obtékání překážek nebo při průtoku armaturami. Tlaková ztráta je pak vyjádřena vztahem

$$p_{zm} = \xi \cdot \rho \frac{w^2}{2} \quad [Pa], \quad (2.38)$$

kde

ξ je součinitel místních ztrát [1] (obvykle se určuje experimentálně),

ρ je hustota tekutiny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

w je střední rychlost tekutiny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Předchozí odstavce čerpány z [4].

2.2.2.3 Celkové ztráty

Celková tlaková ztráta v potrubí je dána součtem všech dílčích tlakových ztrát třením i ztrát místními vřazenými odpory podle vztahu

$$p_z = \sum p_{zi} = \sum \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \xi_i \right) \frac{w^2}{2} \quad [Pa]. \quad (2.39)$$

Předchozí odstavce čerpány z [4].

2.3 NUMERICKÉ SIMULACE

Znalost proudění je při optimalizaci jakéhokoli zařízení velmi důležitá. Vývoj nového nebo inovace stávajícího zařízení je velice zdoluhavá a nákladná záležitost, a je zde velký důraz na vyváženost reálně dosažitelných parametrů zařízení oproti ceně a technologickým možnostem výroby. Tradiční postup při konstrukci obvykle spočíval ve výrobě prototypu zařízení, s několika verzemi důležitých součástí. Potom následovalo experimentální ověření v laboratorních nebo i reálných podmínkách, s různými kombinacemi variant základních dílů. Na základě těchto výsledků pak byla zvolena optimální varianta.

V současné době se při vývoji většiny technických zařízení stále častěji využívají metody numerických simulací různých fyzikálních procesů a jevů. Předpokladem pro tyto simulační metody je neustále se zdokonalující výpočetní technika, zejména její stále se zvyšující výpočetní výkon. Hlavním smyslem těchto metod je možnost vytvoření modelu zkoumané situace nebo experimentu, který dokáže ušetřit nejen čas, ale také finanční prostředky, které by jinak bylo nutno vynaložit při skutečném vývoji zařízení nebo při zkoumání skutečného fyzikálního problému. Tyto metody navíc umožňují zjištění zkoumaných veličin i v místech, kde by jejich měření bylo obtížné, mnohdy i nemožné, nebo by skutečným měřením docházelo k nežádoucímu ovlivňování naměřených hodnot.

2.3.1 CFD programy

Zkratka CFD (Computational Fluid Dynamics) ve volném překladu znamená matematické modelování proudění tekutin. Principem funkce těchto výpočtových programů je přibližné numerické řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic, které matematicky popisují proudění tekutiny, přenos tepla, rozptyl částic nebo chemické reakce. Metoda pracuje s rovnicemi zachování hmoty, hybnosti a energie.

Při řešení se používají diskretizační metody, v případě proudění nejčastěji metoda konečných objemů. Smyslem diskretizace je rozdělení spojitého prostředí na konečně malé kontrolní objemy (buňky). Proměnné proudového pole jsou aproximovány svými hodnotami ve středu elementu. Metoda kontrolních objemů zachovává kontinuitu v objemovém elementu, použitím Gaussovy věty se stranové hodnoty proměnných násobí plochou strany neortogonálních objemových elementů. [9]

2.3.2 ANSYS Workbench

Výpočtové programy pro dynamiku tekutin jsou plně integrovány do programu ANSYS Workbench. To přináší snadné a přehledné nastavení a ovládání pracovních postupů při CFD simulacích, neboť je sjednoceno vytvoření geometrie, sítě (diskretizace), nastavení okrajových podmínek úlohy v preprocesoru, samotný numerický výpočet dané úlohy řešičem, a vyhodnocování a vizualizace výsledků v postprocesoru. Lze tak řešit úlohy proudění jedno či vícefázového, izotermního nebo se sdílením tepla, stlačitelné nebo nestlačitelné, případně i s chemickými reakcemi nebo s rozptylem částic v tekutině. [9]

Pro dynamiku tekutin jsou v prostředí ANSYS Workbench integrovány nyní již velmi rozšířené programy Fluent a CFX. Druhý jmenovaný program byl použit k numerickým simulacím v této práci.

2.4 MĚŘENÍ RYCHLOSTI A TEPLoty

2.4.1 Anemometr se žhaveným drátkem

Tento druh anemometrie je jedna z metod měření rychlosti proudění. Nejdůležitější součástí každého anemometru pracujícím na tomto principu je sonda, skládající se z držáku a samotného žhaveného tělíska. To bývá nejčastěji drátek o velmi malém průměru (řádově $1 \cdot 10^{-3}$ mm). Tělísko je elektricky zahříváno na konstantní teplotu. Obtékání kapaliny či plynu okolo sondy tělísko ochlazuje. Tím dochází ke zvýšenému odběru elektrického proudu pro zahřívání tělíska. Rychlost proudění média je pak přímo úměrná průtoku elektrického proudu tělískem. [10]

2.4.1.1 Testo 425

Přístroj Testo 425 viz obr. 8 je anemometr se žhaveným drátkem, s pevně připojenou sondou rychlosti a teploty proudění.



Obr. 8 Žhavený anemometr TESTO 425

Sonda je umístěna na špičce teleskopické trubice (průměr špičky sondy je 7,5 mm) s délkou maximálního vysunutí 820 mm. Elektrické napájení přístroje je řešeno 9V baterií 6F22. Přístroj má tyto parametry a funkce:

Tab. 2 Technické parametry přístroje TESTO 525

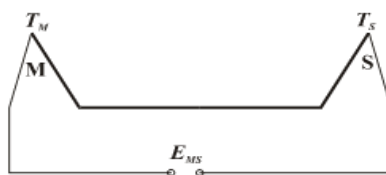
TESTO 425	teplota [°C]	rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
měřicí rozsah	-20 až +70	-0 až +20
přesnost (0 až +60°C)	$\pm 0,5$	$\pm 0,03$
přesnost (zbytek rozsahu)	$\pm 0,7$	$\pm 0,03$
rozlišení	0,1	0,01

- Měření teploty, proudění a objemového průtoku
- Vytvoření bodové a časové střední hodnoty
- Hodnoty max. / min.
- Tlačítko Hold pro podržení naměřené hodnoty

Čerpáno z [11].

2.4.2 Termoelektrické snímače teploty (termočlánky)

Teploměry tohoto druhu se používají k měření teploty. Jsou založeny na Seebeckově termoelektrickém jevu - při různé teplotě konců vodiče se na každém konci objeví jiný potenciál. Základní zapojení termočlánku ze dvou vodičů zhotovených z různých materiálů je na obrázku 9. Měřicí spoj je označen M, srovnávací spoj S. T_M [K] je teplota měřicího spoje, T_S [K] je teplota srovnávacího spoje. E_{MS} [V] je termoelektrické napětí, je závislé na rozdílu teplot $T_M - T_S$.



Obr. 9 Termoelektrický článek

Termočlánky, jsou normalizovány včetně písmenného a barevného označení:

- | | | |
|-----|------------------------|-----------------|
| - K | chromel-alumel | zelená / bílá, |
| - T | měď-konstantan | hnědá / bílá, |
| - J | železo-konstantan | černá / bílá, |
| - E | chromel-konstantan | fialová / bílá, |
| - R | platinarhodium-platina | oranžová / bílá |

Čerpáno z [10].

2.5 VYTÁPĚCÍ JEDNOTKA

Vytápěcí jednotky jsou zařízení pro ohřev (někdy i chlazení) vzduchu, převážně v průmyslových aplikacích, kde bývají obvykle požadovány hodinové průtoky vzduchu v řádech tisíců m^3 .

2.5.1 LH

Vytápěcí jednotky LH (obr. 10 vlevo) od firmy Wolf Česká republika s.r.o. jsou zařízení schopná pracovat s průtoky vzduchu 2100 až $9000\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Jednotky jsou odstupňované do čtyř konstrukčních velikostí. Jejich konstrukce je tvořena ocelovým pozinkovaným rámem, svařeným z uhlíkových profilů.

Jednotky jsou vybaveny dvourychlostním axiálním motorventilátorem s napájením 1x230V nebo 3x400V. Pro ohřev vzduchu slouží výměníky s hliníkovými lamelami a měděnými trubkami, s nuceným oběhem teplé nebo horké vody o maximálních parametrech 130°C a 1,6MPa.

Předchozí odstavce čerpány z [12].



Obr. 10 Vytápěcí jednotky-vlevo LH Wolf Česká republika s.r.o., vpravo Savana Multi-VAC s.r.o.

2.5.2 SAVANA

Vytápěcí jednotky SAVANA (obr. 10 vpravo) od firmy Multi-VAC s.r.o. jsou určeny pro průtoková množství vzduchu 1550 až $6100\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Jsou odstupňované ve třech konstrukčních velikostech a ve dvou designových provedeních. Konstrukce jednotky je vyrobena z ocelového pozinkovaného a lakovaného plechu.

Jednotka je vybavena axiálním ventilátorem s externí třístupňovou regulací otáček a vodním výměníkem z hliníkových lamel a měděných trubek. Výměník je určen pro nucený

oběh topné vody. Maximální provozní teplota vody ve výměníku je 100°C a maximální provozní tlak 1,6MPa.

Předchozí odstavce čerpány z [13]

2.5.3 LEO

Vzduchové ohřívače LEO (obr. 11) firmy Flowair jsou zařízení pro průtoková množství vzduchu 1550 až 6100m³·h⁻¹. Jsou vyráběny ve dvou výkonových a dvou designových variantách „Standard“ a „Plastic“. Konstrukce jednotek je vyrobena z ocelového pozinkovaného a lakovaného plechu.

Jedno-rychlostní axiální ventilátor je standardně napájen napětím 230V/50Hz, alternativně je možné též napěťové řízení 0-10V plynulé regulace otáček (EC). Lopatky ventilátoru jsou vyrobeny z plastu, což umožňuje snížit hmotnost a hlučnost zařízení. Ventilátor může pracovat při teplotách do 60°C.



Obr. 11 Vytápěcí jednotka LEO firmy Flowair

Jako topné médium slouží teplá nebo horká voda, která prostřednictvím výměníku tepla ohřívá vháněný vzduch. Nižší výkonová varianta LEO 30 je vybavena jednořadým výměníkem, vyšší výkonová varianta LEO 50 je vybaven dvouřadým výměníkem. Oba typy výměníků se skládají z měděných trubek, na nichž jsou navlečeny hliníkové lamely. Maximální provozní teplota topné vody je 130°C a tlak 1,6MPa.

Předchozí odstavce čerpány z [14]

2.5.4 SAHARA

Jednotky Sahara (obr. 12) od firmy GEA Heat Exchangers jsou s různými inovacemi vyráběny již několik desetiletí. V současnosti jsou vyráběny jednotky s obchodním názvem „SAHARA MAXX“. Tyto jednotky se vyrábí v pěti konstrukčních velikostech, s jedno, dvou a tří rychlostním axiálním nebo radiálním ventilátorem, s čtyřmi výkonovými řadami výměníků na topné medium teplá nebo horká voda, se třemi výkonovými řadami výměníků na topné médium pára, nebo se spalínovým výměníkem či elektrickým ohříváčem.

Konstrukce jednotky je vyrobena z ocelového pozinkovaného plechu. Všechny typy jednotek je možno dodat v designové verzi „Industry“, vhodné do průmyslových aplikací s menšími nároky na estetiku, většinu typů lze dodat i ve vyšší designové verzi „Comfort“.



Obr. 12 Vytápěcí jednotka Sahara MAXX firmy GEA Heat Exchangers

K jednotkám se dále dodává široká řada dalšího modulového příslušenství, z něhož lze sestavit ucelený vzduchotechnický systém, umožňující sání, výdech, filtraci, směšování vzduchu, i zpětné získávání (rekuperaci) tepla v průmyslových provozech, včetně různých způsobů upevnění všech těchto zařízení na stěny, stropy či střechy budov. V nabídce jsou i jednotky a příslušenství s možností volby barevného odstínu na přání, v nerezovém provedení nebo pro provoz v prostředí s nebezpečím výbuchu.

Protože tato práce volně navazuje na bakalářskou práci [16], byla pro tuto práci zvolena jednotka první (nejmenší) konstrukční velikosti, v konfiguraci s třírychlostním axiálním motorventilátorem a s výměníky typu voda/vzduch se dvěma a třemi řadami trubek. Předchozí odstavce čerpány z [15].

2.6 VÝMĚNÍKY VODA-VZDUCH

Protože se tato práce zabývá optimalizací výkonu vytápěcí jednotky Sahara první konstrukční velikosti, další popis se týká výměníků této jednotky.

Základem výměníku typu voda/vzduch (obr. 13 vlevo) je vzduchotechnický kanál čtvercového průřezu o rozměrech 450×450mm z ocelového pozinkovaného plechu. V kanálu je kolmo k proudícímu vzduchu umístěn topný blok. Ten je složený z hliníkových lamel, kterými prochází měděné trubky, kterými proudí topná voda. Trubky jsou uspořádány ve svislých řadách, a mezi řadami jsou v šachovnicovém uspořádání. Vzájemné hydraulické propojení trubek je provedeno vratnými kolény viz obr. 13 vpravo.



Obr. 13 Výměník voda/vzduch, vlevo čelní pohled, vpravo detaily bočních propojení trubek kolínky

Při výrobě výměníků jsou lamely lisovány ze svitku hliníkové folie, a jsou navlékány na řady trubek, ohnutých do tvaru U. Po navlečení určeného počtu lamel jsou dovnitř trubek zavedeny tvářecí trny, které se protlačují skrz celou délku trubek, přitom se mírně zvětší průměr trubek a dojde k pevnému mechanickému a tepelně vodivému spojení s lamelami, nutnému k dobrému vedení tepla. Poté jsou na volné konce trubek napájena vratná kolínka a rozváděcí a sběrné trubky s přípojovacími hrdly. Díky ohnutí trubek do tvaru U je třeba pájet pouze kolínka na jedné straně výměníku. Propojení kolínky je pevně dáno uspořádáním vodních cest, tedy počet a pořadí jednotlivých trubek, kterými voda skrz výměník protéká. Po zapájení je každý výměník ponořen do nádrže s vodou a je zkoušen na těsnost tlakovým vzduchem.

Předchozí odstavce čerpány z [15].

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 CÍL

Cílem této práce bylo ověřit výkonové charakteristiky průmyslové vytápěcí jednotky s obchodním názvem *Sahara MAXX*, a navrhnout možná zlepšení přenosu tepla. Zvolena byla jednotka první konstrukční velikosti, s třístupňovým axiálním motorventilátorem, a s výměníky typu voda/vzduch se dvěma a třemi řadami topných trubek.

3.2 ÚKOLY

Pro dosažení stanoveného cíle, musely být splněny tyto úkoly:

- a) Rešerše stávajícího stavu poznání.
- b) Příprava experimentů a měření výkonových charakteristik stávající jednotky SAHARA.
- c) Numerická simulace proudění vzduchu ve výměníku tepla voda-vzduch.
- d) Návrh optimalizované teplosměnné plochy.
Numerická simulace proudění kolem optimalizované teplosměnné plochy.
- e) Porovnání výsledků a jejich analýza.

3.3 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

V bakalářské práci [16] bylo jako doporučení pro další výzkum zmíněno použití přesnějšího způsobu umístění sondy žhaveného anemometru ve výdechovém prostoru výměníku, při měření teplotního a rychlostního pole. V návaznosti na toto doporučení bylo přistoupeno ke zkonstruování a výrobě polohovatelného polohovacího zařízení s přesně definovanými a aretovanými polohami měřených bodů.

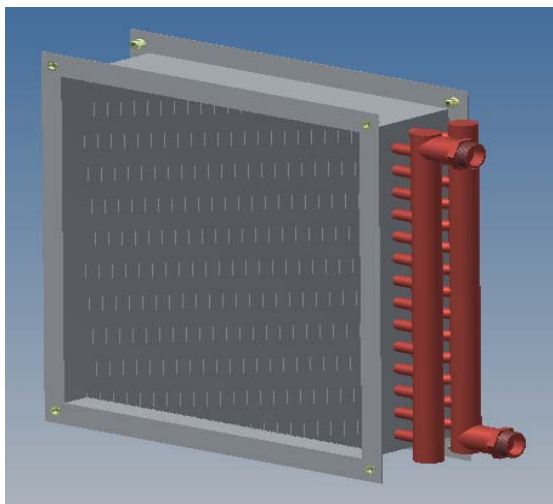
3.4 POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Mezi hlavní požadované funkce navrhnutého polohovacího zařízení patří:

- zajištění co možná nejpresnějšího geometrického umístění čidla žhaveného anemometru v přesně definovaných polohách na výdechovém průřezu výměníku,
- možnost libovolného opakování nastavení všech poloh,
- řádově vyšší počet měřených bodů než v původním měření,
- dostatečná tuhost zařízení pro eliminaci nežádoucího pohybu sondy,
- co možná nejmenší vliv zařízení na samotné proudění vzduchu.

3.4.1 Návrh konstrukce

Jako základ pro další konstrukci byl použit výměník z vytápěcí jednotky SAHARA MAXX, první konstrukční velikosti. Základem tohoto výměníku (obr. 14) byl rám, sestavený ze čtyř segmentů, tvořící po stranách čtvercové příruby. V rozích přírub byly umístěny 4ks maticových nýtů M8 pro připojení ostatních komponent vytápěcí jednotky. Tyto rohové maticové nýty byly použity pro upevnění polohovacího zařízení k výměníku.

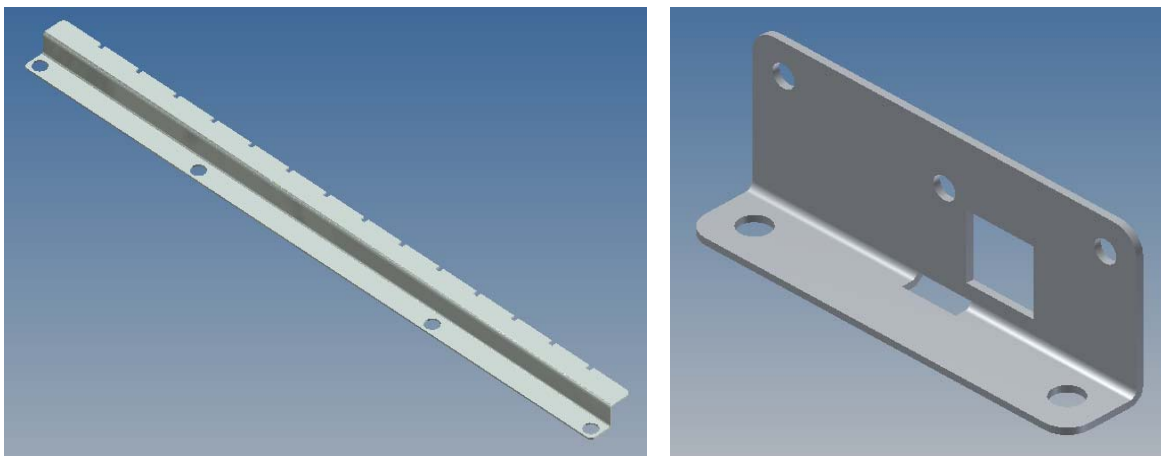


Obr. 14 Model výměníku voda/vzduch z vytápěcí jednotky Sahara MAXX

Výdechový průřez výměníku uvnitř příruby měl rozměry 450×450mm. Pro dostatečně vypovídající měření rychlostního a teplotního pole bylo zvoleno 10 měřených bodů v horizontálním i vertikálním směru, čímž bylo možno měřit celkem ve 100 bodech. Každému měřenému bodu tak odpovídalo plošné pole o rozměru 45×45mm.

3.4.2 Součástky

Kromě normalizovaných součástek, jako jsou šrouby a matice, bylo třeba vyrobit několik speciálních dílů. Pro upevnění celého polohovacího zařízení k výměníku sloužily 2ks dílu **DP-01** (HORIZONTÁLNÍ VEDENÍ) viz obr. 15 vlevo. Jak už plyne z názvu, díl zároveň zajišťoval vedení v horizontálním směru a i aretaci ve zvolených 10ti polohách. Rozvin dílu byl vystřížen z ocelového pozinkovaného plechu tloušťky 1,5mm na CNC vystřihovacím lisu, ohnutí bylo provedeno na CNC ohraňovacím lisu. Ohnutí do profilu „Z“ bylo třeba pro odsazení vedení od roviny příruby výměníku. Pro upevnění k výměníku slouží otvory $D=15\text{mm}$, pro aretaci v deseti polohách slouží zářezy $5\times 5\text{mm}$ s roztečí 45mm pro aretační šroub M5.



Obr. 15 Modely dílů vlevo DP-01 HORIZONTÁLNÍ VEDENÍ, vpravo DP-02 DÍL DRŽÁKU VEDENÍ

Zde stojí za zmínku určitá zvláštnost konstrukce zařízení. Na první pohled se totiž může zdát, že otvorů pro upevnění i zářezů pro aretaci bylo více, než je potřeba, tedy čtyři otvory pro upevnění namísto dvou, a čtrnáct zářezů pro aretaci na místo deseti.

Bylo tomu tak proto, aby co možná největší část polohovacího zařízení byla umístěna mimo měřený proud vzduchu, a ovlivňovala tak co nejméně měřené proudění. Při měření proudění v některém z krajních polí, pak se v tomto místě nacházelo pouze čidlo, ale celý zbytek zařízení byl stranou, mimo průřez výměníku. Proto bylo vedení a aretace nutné i zde. Aby nebyl potřeba zvlášť horní a zvlášť dolní díl, byla z výrobních důvodů geometrie dílu zvolena jako splynutí obou dílů zrcadlově souměrně přesazených do jednoho.

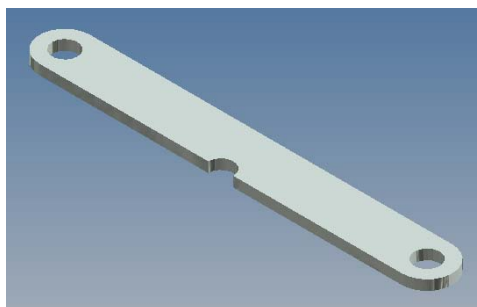
K posuvu po horizontálním vedení sloužily 4ks dílu **DP-02** (DÍL DRŽÁKU VEDENÍ) viz obr. 15 vpravo, dva díly na horním vedení, dva na dolním vedení. Rozvin dílu byl vystřižen z ocelového pozinkovaného plechu tloušťky 1,5mm na CNC vystřihovacím lisu, ohnutí bylo provedeno na CNC ohraňovacím lisu.

Ohnutí do profilu „L“ bylo třeba k upevnění vertikálního vedení (díl DP-04) v otvorech $D=6,4\text{mm}$. Dva krajní otvory $D=5\text{mm}$ sloužily k montáži páru těchto dílů k sobě, střední otvor $D=5\text{mm}$ byl třeba k aretaci polohy ve vertikálním i horizontálním směru. Výřez v místě ohybu byl třeba pro pohyb vertikální aretace (díl DP-05). Čtvercový výřez pak sloužil již jen pro vyšší komfort měření, bylo v něm viditelné číslo aktuálně nastavené horizontální polohy mechanismu.

K zajištění vůle nutné pro pohyb po horizontálním vedení byl použit díl **DP-03** (VLOŽKA VEDENÍ) viz obr. 16 nahoře. Díl byl vyroben z ploché ocelové pozinkované

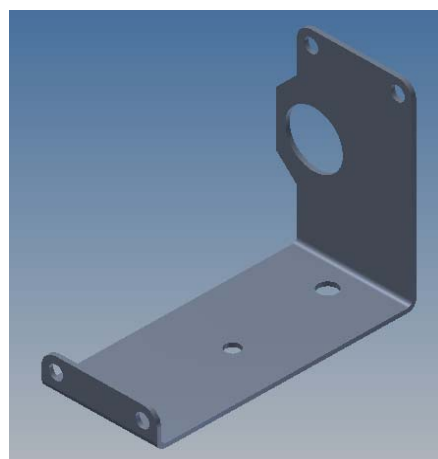
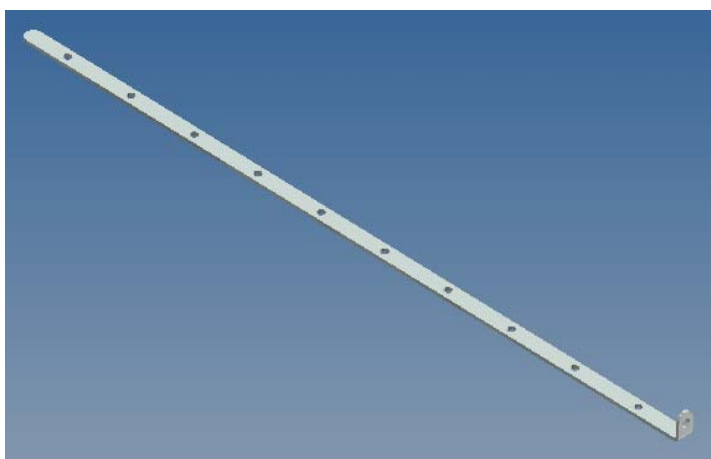
tyče o průřezu 10×2mm, otvory byly vyvrtány po orýsování ruční elektrickou vrtačkou, ostatní zaoblení byla obrobena ručně pilníkem v zámečnické dílně.

Díl sloužil jako vložka mezi dva k sobě smontované díly DP-02, jeden na horním vedení, jeden na dolním vedení. Proto byla rozteč krajních otvorů $D=5\text{mm}$ shodná s roztečí stejných otvorů na dílu DP-02, a též poloha půlkruhového výřezu uprostřed dílu přesně odpovídala poloze aretačního otvoru v dílu DP-02.



Obr. 16 Modely dílů - nahoře DP-03 VLOŽKA VEDENÍ, dole DP-04 VERTIKÁLNÍ VEDENÍ

Pro zajištění posuvu ve vertikálním směru sloužily 2ks dílu **DP-04** (VERTIKÁLNÍ VEDENÍ) viz obr. 16 dole. Oba byly vyrobeny z ocelové tyče průměru 6mm, na koncích opatřené závity M6. Kruhový průřez tyče byl dostatečně vyhovující pro tuhost v ohybu ve všech směrech, závitové konce tyče pak sloužily k upevnění s možností nastavení správné pracovní délky vertikálního vedení.



Obr. 17 Modely dílů vlevo DP-05 VERTIKÁLNÍ ARETACE, vpravo DP-06 DÍL DRŽÁKU SONDY

Pro zajištění zvolených 10ti poloh ve vertikálním směru sloužil díl **DP-05** (VERTIKÁLNÍ ARETACE) viz obr. 17 vlevo. Díl byl vyroben z ploché ocelové pozinkované tyče o průřezu 10×2mm, otvory byly po orýsování vyvrtány ruční elektrickou vrtačkou, ostatní zaoblení byla obrobena ručním pilníkem v zámečnické dílně, ohnutí bylo provedeno na ručním ohýbadle.

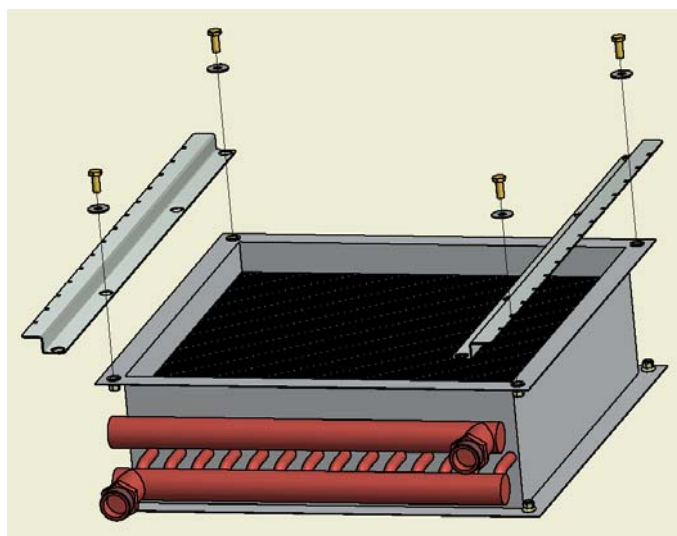
Pro správnou funkci držáku čidla bylo nutné upevnění čidla alespoň ve dvou bodech, a současně zajištění vertikálního pohybu. Těchto požadavků bylo dosaženo použitím dvou dílů ohnutých do dvojitého „L“ **DP-06** (DÍL DRŽÁKU ČIDLA) viz obr. 17 vpravo. Rozvin dílu byl vystřižen z ocelového pozinkovaného plechu tloušťky 1,5mm na CNC vystřihovacím lisu, ohnutí bylo provedeno na CNC ohraňovacím lisu.

Otvory $D=5\text{mm}$ na koncích krátké a dlouhé obruby sloužily pro smontování dvou dílů k sobě, otvory $D=6,4\text{mm}$ procházely vertikální vodící tyče (díly DP-04). K montáži vertikální aretace (díl DP-05) byl použit jeden prostřední otvor $D=5\text{mm}$. Největší otvor $D=20\text{mm}$ pak byl potřeba pro zamontování vývodky $M20\times 1,5$ k upevnění samotné sondy.

Důvodem vyosení otvoru $D=20\text{mm}$ mimo rovinu souměrnosti dílu byla potřeba umístění čidla co nejbližší měřenému výdechovému průřezu výměníku, a současně zamezení kolize držáku s hlavami šroubů M8, kterými bylo celé zařízení připevněno k výměníku.

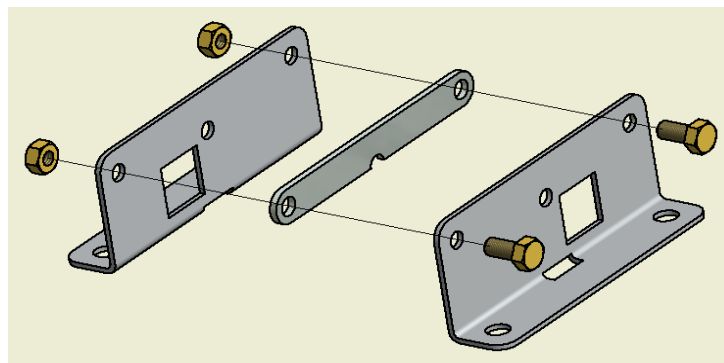
3.4.3 Sestavení

Sestavení celého polohovacího zařízení bylo provedeno dle výkresu sestavení viz výkres a kusovník DP-00 v příloze č. 4.



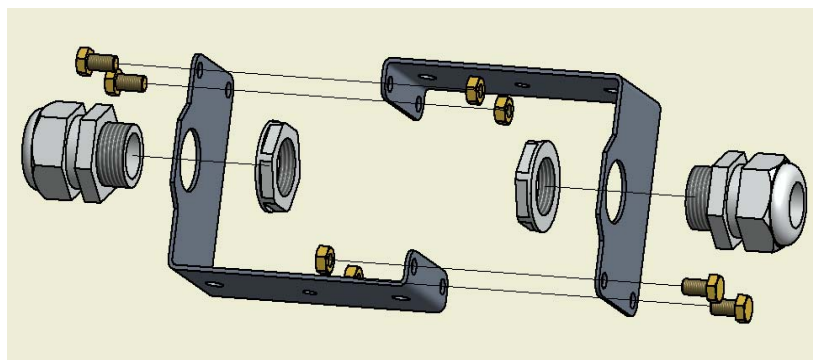
Obr. 18 Montáž horizontálních vedení na výměník

Nejprve byly na přírubu výměníku namontovány oba díly DP-01 viz obr. 18. Jak již bylo zmíněno, v rozích příruby výměníku byly osazeny maticové nýty M8. Průměr čelního nákrůžku těchto nýtů odpovídal průměru otvorů $D=15\text{mm}$ v dílech DP-01, čímž bylo zajištěno jejich snadné a přesné ustavení do správné polohy vůči výměníku. Přesazení delších konců obou dílů DP-01 vůči přírubě výměníku bylo na stranu hrdel. Takto ustavené díly DP-01 byly následně přišroubovány 4ks šroubů $M8\times 20$ s plochými podložkami.



Obr. 19 Sestavení držáku vedení

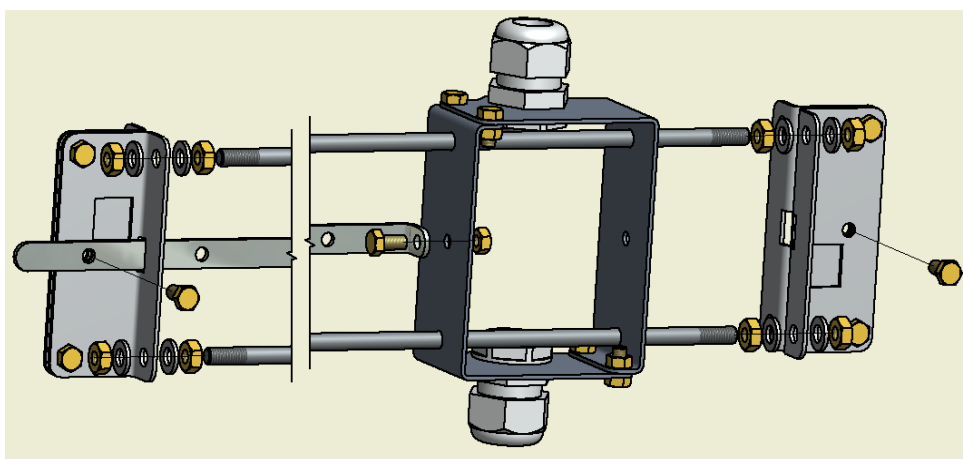
Sestavení držáku vedení bylo provedeno dle obr. 19. Jednalo se sešroubování 2ks dílu DP-02 proti sobě a vložení 1ks dílu DP-03 mezi ně. Do sousých krajních otvorů $D=5\text{mm}$ byly vloženy 2ks šroubů $M5\times 12$ a zajištěny 2ks matic M5.



Obr. 20 Sestavení držáku sondy

Montáž držáku sondy byla provedena dle obr. 20. Po smontování 2ks dílu DP-06 pomocí 4ks šroubů $M5\times 12$ a 4ks matic M5 vznikl rámeček se sousými otvory $D=6,4\text{mm}$ pro průchod vertikálních vodících tyčí DP-04. Dále vznikla dvojice sousých otvorů $D=20\text{mm}$ pro montáž vývodků $M20\times 1,5$ s maticí, do obou otvorů. Vsunutím sondy žhaveného anemometru (na obr. 20 není zobrazeno) skrz vývodky a jejich dotažením vzniklo požadované upevnění sondy.

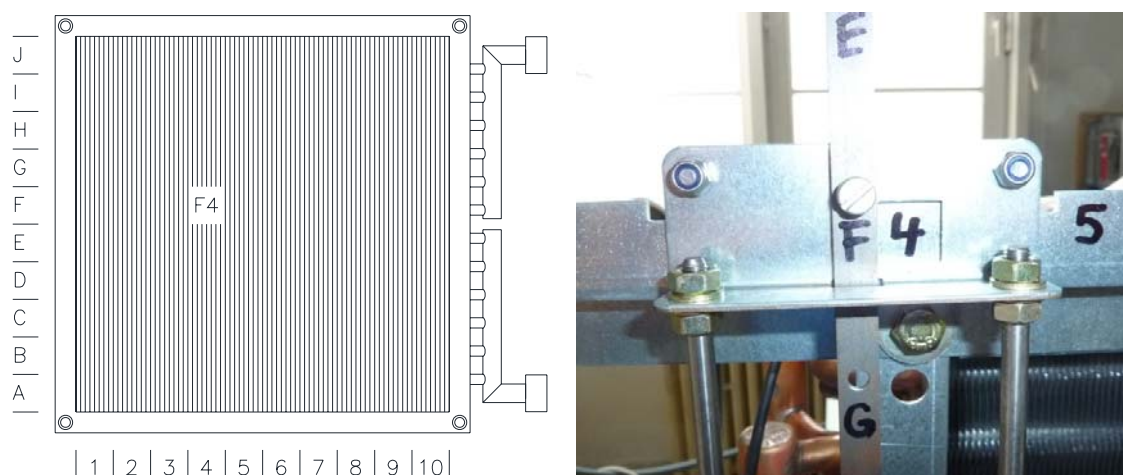
Do sestaveného držáku sondy byly dále nasunuty tyče vertikálního vedení DP-04 viz obr. 21, na každý ze čtyř závitových konců tyčí byla našroubována matice M6 a navléknuta plochá podložka, konec tyčí byl provléknut sestaveným držákem vedení, a volný závitový konec každé tyče byl zajištěn další plochou podložkou a maticí M6. Pro zajištění poloh ve vertikálním směru byl do sestavy ještě zamontován díl DP-05. Dlouhý konec procházel výřezem v držáku vedení, a krátký konec byl přišroubován k držáku sondy pomocí šroubu M5x12 a matice M5. Celý tento komplet byl pak nasunut na připravené horizontální vedení namontované na výměníku.



Obr. 21 Sestavení vertikálního vedení a aretace (pozor, zde zobrazeno v horizontální poloze)

Pro zajištění správné vůle při horizontálním pohybu bylo ještě nutno správně seřadit délku vertikálních vodících tyčí přestavením matic M6 na jejich koncích. K zajištění požadované polohy posuvných částí zařízení vůči výměníku pak bylo nutno nastavit příslušný otvor v dílu vertikální aretace DP-05 vůči otvoru v držáku vedení a zajistit vsunutím šroubu M5.

Jak již bylo uvedeno výše, je výdechový otvor výměníku rozdělen na 100 polí, a jednotlivá pole jsou v horizontálním směru označena čísly 1 až 10, ve vertikálním směru písmeny A až J viz obr. 22 vlevo, proto je pro větší přehlednost provedeno příslušné značení. Na horizontálních vedeních DP-01 je proveden popis jednotlivých aretačních zářezů, a to tak, že při nastavení konkrétní polohy je příslušné číslo vidět ve výřezu držáku vedení. Stejně tak je proveden popis ve vertikálním směru, na díl vertikální fixace DP-05, a to tak, že při nastavení konkrétní polohy bylo příslušné písmeno vidět před výše zmíněným číslem. Bylo tak ihned patrné, na jaké souřadnici (měřeném poli) je právě zařízení nastaveno viz obr. 22 vpravo.



Obr. 22 Vlevo označení polí výdechového průřezu, vpravo nastavení polohovacího zařízení na F4

3.5 MĚŘENÍ TEPLITNÍHO A RYCHLOSTNÍHO PROFILU

3.5.1 Varianty vytápěcí jednotky

Pro dostatečně vypovídající měření výkonových charakteristik bylo zvoleno celkem šest variant kombinací teplotních spádů topné vody a otáček ventilátoru. Protože měření vycházelo z výsledků měření konstrukčně stejných výměníků měřených v rámci bakalářské práce [16], byla snaha alespoň pro některá měření nastavit stejné parametry. V praxi se však tento záměr podařilo splnit jen z části. Přehled měřených variant a jim příslušejících teplotních spádů topné vody je uveden v tabulce č. 3.

Tab. 3 Přehled měřených variant

číslo měření - varianta	1	2	3	4	5	6
řady trubek ve výměníku	2	2	2	3	3	3
stupeň otáček ventilátoru	1	2	3	1	2	3
teplota topné vody [°C]	60	55	60	70	70	70
teplota vratné vody [°C]	50	45	40	45	45	40

3.5.2 Sestavení a příprava topného okruhu

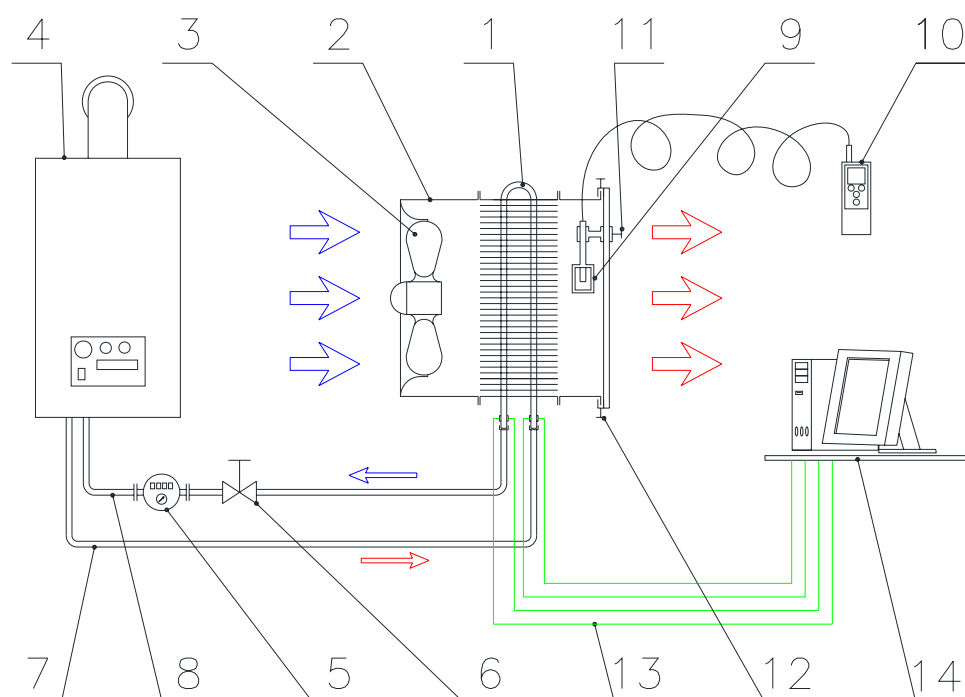
Před měřením byl příslušný výměník namontován na plechovou skříň s axiálním motorventilátorem. Na styčné plochy mezi výměníkem a skříní bylo nalepeno těsnění k zamezení úniků vzduchu mimo výměník. K měření teplot topné a vratné vody bylo použito termoelektrických teploměrů typ K. Jeden konec každého z nich byl obalen tepelně vodivou pastou, a pomocí kovových stahovacích spon byl upevněn na hrdlo výměníku pro

připojení topné a výstupní vody. Druhý konec každého z termoelektrických čidel byl připojen do multifunkčního převodníku ADAM, spojeném s PC. Vyhodnocení měřených teplot bylo prováděno v programu Advantech Genie.



Obr. 23 Vlevo žhavený anemometr TESTO 425, vpravo detail upevnění sondy v držáku

Pro zajištění přesnosti měření byla čidla zdvojená, tedy na každém hrdle byla namontována dvě čidla, ve vzájemném odstupu 180° . Jako opatření ke zmenšení tepelných ztrát v místě upevnění čidel do okolního prostředí byly přívodní trubky výměníku i s čidly tepelně zaizolovány. Celkové schéma měření rychlostí a teplot je zobrazeno na obr. 24.



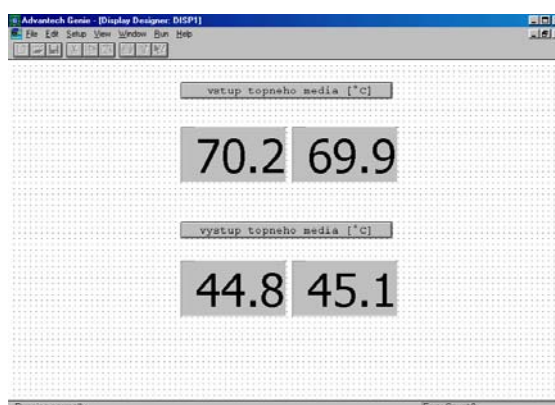
Obr. 24 Schéma měření teploty a rychlosti vzduchu: 1) výměník, 2) skříň ventilátoru, 3) axiální motorventilátor, 4) plynový kotel, 5) průtokoměr topné vody, 6) regulační ventil, 7) potrubí topné vody, 8) potrubí vratné vody, 9) čidlo žhaveného anemometru, 10) anemometr, 11) vertikální vedení polohovacího zařízení, 12) horizontální vedení polohovacího zařízení, 13) termoelektrické teploměry, 14) PC s multifunkčním převodníkem ADAM

Pro měření rychlosti a teploty vzduchu byl použit žhavený anemometr TESTO 425 s digitálním displejem (viz obr. 23 vlevo). Jeho sonda byla upevněna v držáku polohovacího zařízení pomocí 2ks kabelových vývodů M20x1,5 viz obr. 23 vpravo.

Jako zdroj topné vody byl použit topný komplet sestávající ze závěsného plynového kotle Viessmann Vitodens 200, průtokového měřidla, teploměrů, uzavíracích a regulačních armatur. K tomuto kompletu byla hrdla výměníku připojena pomocí hadic na teplou vodu, každá o délce cca 3m, Celý tento topný okruh byl napuštěn vodou na provozní tlak kotle (0,15MPa) a odvzdušněn.

3.5.3 Nastavení teplotního spádu

Po otevření kohoutu přívodu plynu a spuštění plynového kotle byla nastavena požadovaná teplota topné vody na displeji řídicího systému kotle. Byl také spuštěn ventilátor na vytápěcí jednotce. Poté bylo třeba několik minut počkat, až teplota topné vody dosáhne nastavené hodnoty, a až dojde k ustálení teplot v celém topném okruhu, přičemž aktuální hodnoty teplot byly zobrazeny na monitoru připojeného PC (viz obr. 25).



Obr. 25 Zobrazení vstupních a výstupních teplot vody v software Advantech Genie

Po ustálení teplot bylo pak ještě nutno nastavit teplotu výstupní vody, k dosažení potřebného teplotního spádu. Toho bylo dosaženo přivíráním kohoutu na zpětném potrubí před vstupem vratné vody do kotle. Po každé změně průtoku bylo zapotřebí opět několik minut počkat na ustálení teplot v celém okruhu, případně doregulovat k žádané teplotě.

3.5.4 Měření rychlostí a teplot proudícího vzduchu

Měřicí sonda anemometru bylo při měření umístěno vždy dprostřed každého z výše popsaných 100 polí, v rovině 16mm od zakončení obvodového rámečku výměníku.

Po dosažení ustáleného teplotního spádu bylo započato proměřování rychlostního a teplotního profilu. Měření začínalo s nastavením polohovacího zařízení na souřadnici A1,

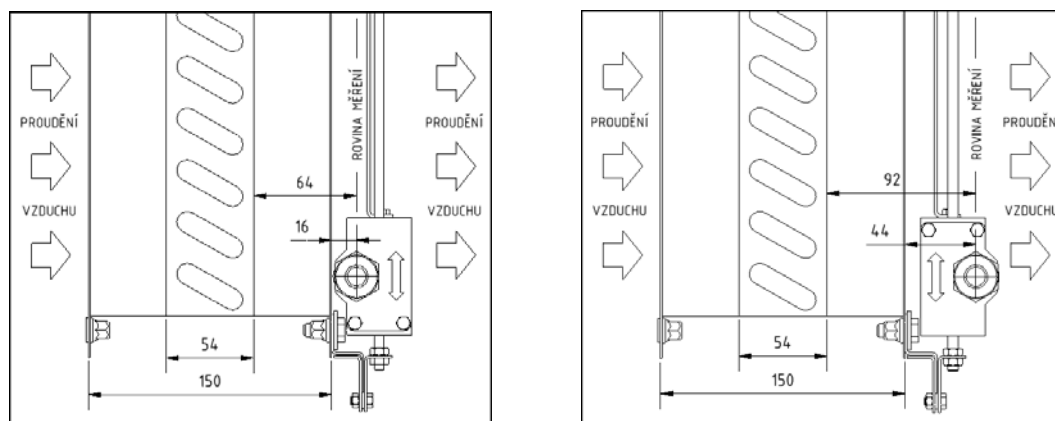
po dobu cca 10s byly naměřené hodnoty zprůměrovány a zapsány do připravených tabulek. Následně bylo polohovací zařízení přestaveno do nové pozice, a celý postup měření opakován. Vzhledem k snadnějšímu nastavení souřadnic ve vertikálním směru bylo od souřadnice A1 postupováno vertikálním směrem. Po dosažení souřadnice J1 bylo zařízení přestaveno ve vertikálním směru do sousední souřadnice J2 a odtud bylo zařízení přestavováno opět vertikálně, tentokrát směrem dolů k souřadnici A2. Takto bylo postupováno až do dosažení souřadnice J10.

Použitý přístroj TESTO 425 byl vybaven funkcí pro záznam měření v určitém zvoleném čase se zprůměrováním naměřených hodnot, což dovolilo nejen odečíst současně naměřené hodnoty teploty i rychlosti při jednom měření, ale jistě přispělo i k zpřesnění naměřených hodnot.

Po odměření celého výměníku při konkrétních nastavených parametrech byly tyto parametry změněny na jiné, a to změnou otáček ventilátoru, a změnou teplotního spádu, případně výměnou dvouřadého výměníku za třířadý, vše opět s výše popsány postupy a časovými prodlevami, nutnými k stabilizaci teplot v celém okruhu.

3.5.5 Doplnkové měření rychlostí a teplot proudícího vzduchu

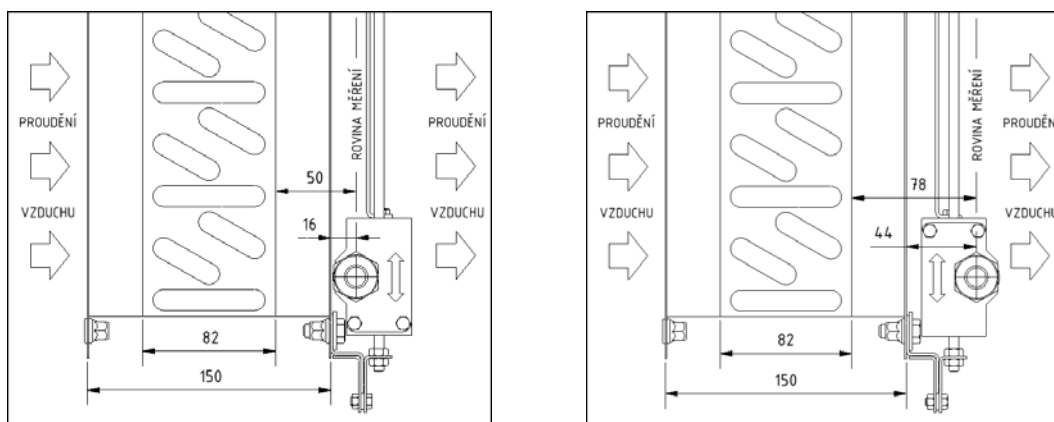
V průběhu měření bylo zjištěno, že konstrukce použitého polohovacího zařízení dovoluje umístění měřicí sondy anemometru nejen v rovině 16 mm před výdechem výměníku, ale též rovině odsazené od prvně měřené roviny o dalších 28 mm, tedy 44 mm od roviny výdechu viz obr. 26 a obr. 27.



Obr. 26 Polohy rovin měření u dvouřadého výměníku-vlevo 64mm od lamel, vpravo 92mm od lamel

Bylo toho dosaženo otočením držáku čidla o 180° kolem podélné osy čidla, při umístění vodících tyčí ve stejných otvorech jako v prvním případě. Tato možnost nebyla v původní myšlence vzniku polohovacího zařízení vůbec uvažována, avšak byla posléze

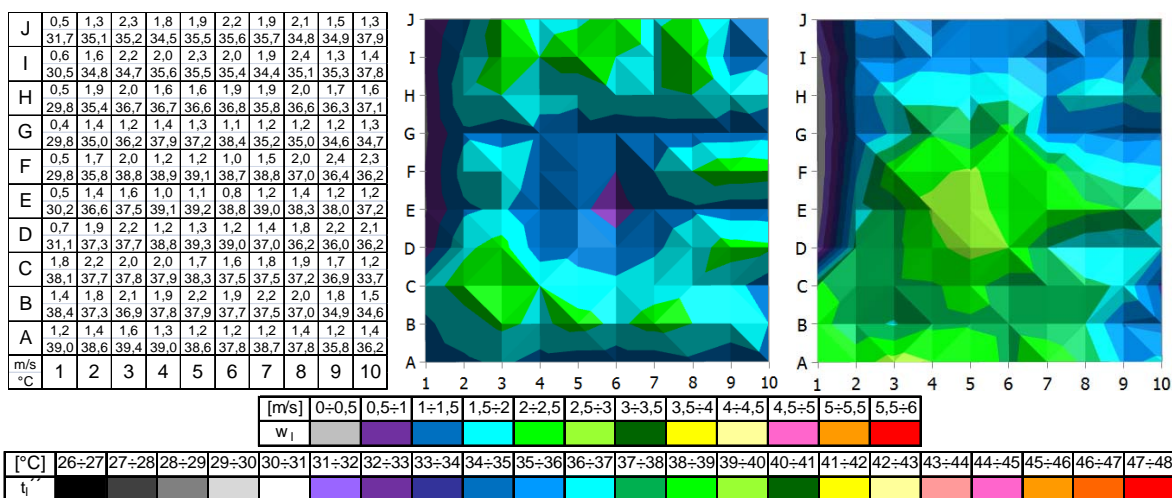
využita k možnosti změřit výdechové parametry výměníku při stejném teplotním spádu ve dvou rovnoběžných rovinách. Porovnáním naměřených hodnot pak bylo možno zjistit, jak se mění proudění se vzdáleností od výměníku.



Obr. 27 Polohy rovin měření u třířadého výměníku-vlevo 50mm od lamel, vpravo 78mm od lamel

3.5.6 Zpracování naměřených hodnot

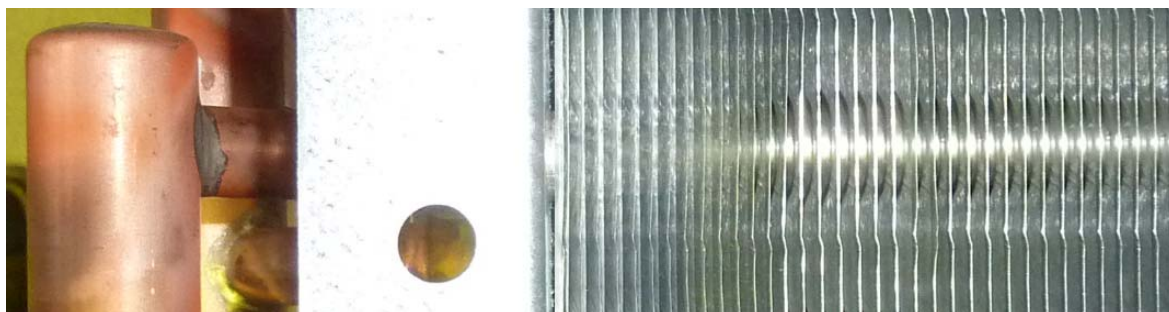
Naměřená data byla v programu MS Excel zpracována do grafů viz obr. 28. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 28 Vlevo naměřené hodnoty rychlostí a teplot, uprostřed rychlostní profil, vpravo teplotní profil, dole porovnávací stupnice rychlostí a teplot

Při zpracování naměřených dat bylo pozorováno minimum teplot i rychlostí na levém okraji, ve tvaru souvislého pásu v délce přibližně dvou třetin výšky výměníku. Toto minimum se objevuje na všech měřeních na tomto výměníku, zatímco v datech z měření na třířadém výměníku nic takového patrné není. Byl proto blíže prozkoumán dvouřadý výměník, kde bylo zjištěno mírné ohnutí lamel v těchto místech. Jelikož podobná poškození lamel výměníků této konstrukce se vyskytují spíše dále od okraje a v mnohem

menším rozsahu jako následek mechanického poškození, pravděpodobně bylo toto ohnutí způsobeno již při výrobě výměníku.



Obr. 29 Detail mírného ohnutí lamel u levého okraje lamelového bloku dvouřadého výměníku

Toto mírné ohnutí lamel mělo za následek částečné odklonění proudu vzduchu v prostoru výdechu a dosažení mnohem nižších hodnot rychlostí i teplot v tomto místě. Z hlediska výroby se tedy jednalo o částečný „zmetek“. Narovnání lamel do správného směru je možné pomocí speciálního hřebene. Toho se však využívá hlavně v případech lehčích mechanických poškození lamel během dopravy a manipulace s výměníkem. V tomto případě však vada nebyla na první pohled patrná, a k jejímu odhalení došlo teprve po vyhodnocení naměřených dat. Podobná deformace byla pak nalezena i na jiném výměníku stejného typu, odkud pochází fotografie na obr. 29.

3.5.7 Výkonová pole

Teplotní pole mívají maxima v místech, kde rychlostní pole mívají minima a naopak. Aby bylo možno zjistit, v kterých místech lamelového bloku výměníku dochází k největší či nejmenším přenosům topného výkonu, byly z naměřených hodnot v jednotlivých měřených polích vypočteny dílčí výkony, a to podle vztahu

$$P_{xy} = \rho \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot v_{xy} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad [W], \quad (3.1)$$

kde

P_{xy} je dílčí tepelný výkon v jednom poli nacházejícím se na souřadnicích x a y [W],

ρ je hustota vzduchu při dané střední teplotě [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

Δx je šířka pole (zde byla vždy konstantní hodnota 0,045m),

Δy je výška pole (zde byla vždy konstantní hodnota 0,045m),

v_{xy} je rychlost proudění vzduchu v poli o souřadnicích x, y [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

c_p je isobarická měrná tepelná kapacita vzduchu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ΔT je rozdíl teplot vzduchu na vstupu a výstupu do a z výměníku [K].

Po vypočtení dílčích výkonů ve všech měřených polích byly z těchto hodnot opět sestaveny grafy, které jsou uvedeny v příloze č. 1, společně s grafy rychlostních a teplotních polí u každé měřené varianty.

3.6 NUMERICKÉ SIMULACE STÁVAJÍCÍHO VÝMĚNÍKU

Pro numerickou simulaci byla zvolena varianta měření č. 5. V té byl použit výměník se třemi řadami trubek, s teplotním spádem topné vody 70/45°C a druhými otáčkami ventilátoru. Pro řešení úlohy byl použit program CFX. Byl řešen přenos tepla z topné vody do vzduchu, proudícího skrz lamelový blok ve výměníku voda-vzduch.

3.6.1 Tvorba výpočtového modelu

Proudění vzduchu ve vytápěcí jednotce Sahara nebo v jiném obdobném zařízení je velmi složitý proces. I když jej uvažujeme jako stacionární děj, v čase neměnný, ve skutečnosti tomu tak není. Už jen samotné proudění vzduchu od ventilátoru k výměníku je vlivem rotujících lopatek oběžného kola pulzující. Hrají zde roli stlačitelnost vzduchu a disipace energie. Složitost těchto jevů by byla mimo rozsah této práce, proto bylo nutno přistoupit k určitým zjednodušením.

Vzhledem k periodicky se opakující geometrii uvnitř lamelového bloku byla simulovaná úloha omezena na výřez, obsahující polovinu tloušťky lamely s přilehlou polovinou tloušťky vzduchové mezery. Umístění výřezu bylo uvažováno do roviny podélně procházející svislou osou vytápěcí jednotky viz obr. 29.

Lamelovým blokem ve skutečnosti procházejí trubky s topnou vodou. V numerickém modelu však trubky nebyly zahrnuty, a to z několika důvodů. Vedle snahy o zjednodušení numerického modelu to byl jednak fakt, že součinitel přestupu tepla na straně vody byl uvažován o dva řády vyšší oproti straně vzduchu, dále materiál trubek byla velmi dobře tepelně vodivá měď, a nakonec samotný výřez lamelového bloku byl velmi krátký, kde se v každé trubce předpokládala konstantní teplota. Proto byly trubky nahrazeny kruhovými otvory, procházejícími lamelou a přilehlou vzduchovou mezerou.

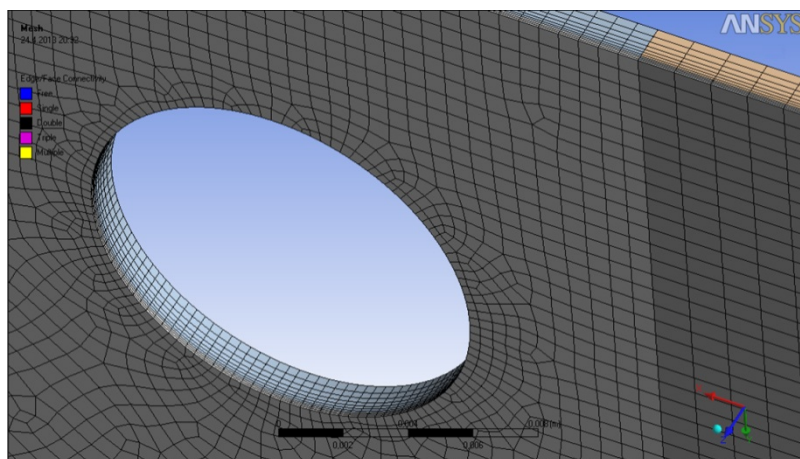
Ve skutečném výměníku se periodicky opakuje řazení jednotlivých trubek do vodních cest, kdy voda protéká jednotlivými trubkami ve výměníku ve stále stejném pořadí. Jako dostačující simulace lamelového bloku byly zvoleny dvě takovéto vodní cesty, sestávající každá z 6ti trubek, a pro dostatečnou objektivitu byly ještě doplněny trubky nad a pod tuto dvojici cest. Při horním a dolním okraji tak sice úloha neodpovídala

skutečnému stavu, nicméně pro hledané výsledky posloužila střední část modelu s hlavní skupinou trubek dvou přímo sousedících vodních cest, kde modelová situace skutečnosti odpovídala.

Jako náhrada proudícího vzduchu do lamelového bloku od ventilátoru byla před lamelový blok předražena další tělesa představující toto proudění. Stejně tak byl simulován vzduch vystupující z výměníku. Mohl tak být simulován i nátok vzduchu na hranu lamely na vstupu do výměníku a úplav za lamelou na výstupu z výměníku. Pro lepší tvorbu sítě byla tloušťka těchto těles volena stejná jako tloušťka lamely a přilehlé vzduchové mezery.

3.6.2 Tvorba výpočtové sítě

Diskretizace úlohy byla provedena vygenerováním sítě složené ze šestistěnných elementů. Byly definovány počty uzlů na vnějších hranách všech těles i na hranách uvnitř sestavy sousedících mezi jednotlivými tělesy. Definován byl i počet uzlů na hranách kruhových otvorů představující trubky viz obr. 30.



Obr. 30 Diskretizace úlohy - detail otvoru představující trubku a zhuštění sítě u povrchu lamely

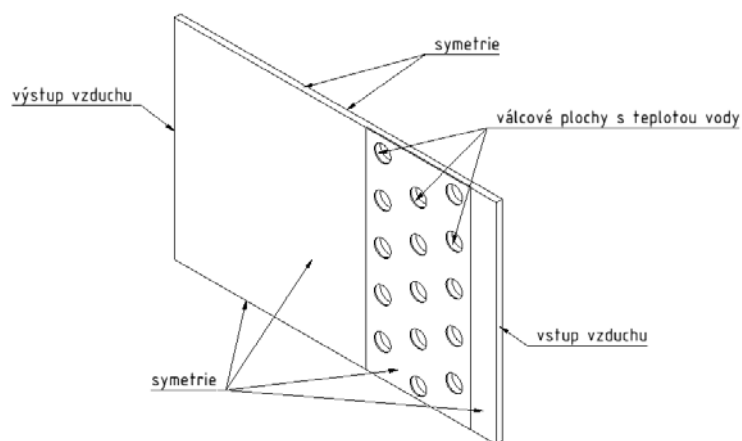
Vzhledem k značnému nepoměru mezi tloušťkou a délkou těles byla při tvorbě prostorové sítě použita metoda „sweep“, tedy kopírování povrchové sítě promítnutím dovnitř těles ve zvoleném počtu vrstev. V lamele byly definovány tři vrstvy, ve vzduchu bylo definováno sedm vrstev, přičemž bylo dále definováno jejich zhuštění směrem k povrchu lamely, kde se při skutečném proudění nachází mezní vrstva s intenzivnějším přestupem tepla.

3.6.3 Stanovení okrajových podmínek

Úloha byla řešena jako stacionární, tedy časově nezávislá. Byly definovány domény těles, a to zejména rozlišení zda jde o tekutiny či tuhé těleso, dále byl zvolen materiál těles,

tedy hliník pro lamelu, a pro ostatní tělesa vzduch s termofyzikálními vlastnostmi při 25°C. Pro obě domény byly nastaveny též jejich vlastní inicializace.

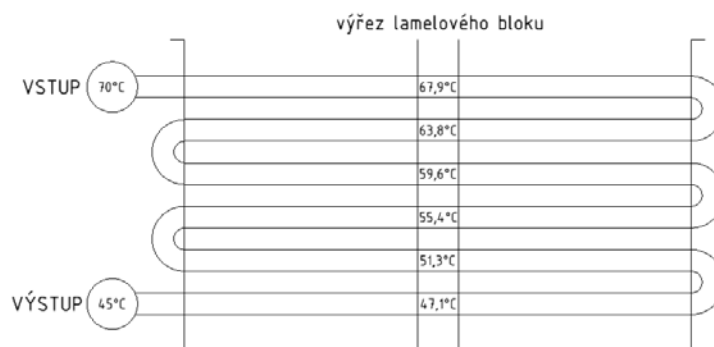
Protože se celá úloha sestávala z celkem 6ti těles, bylo zapotřebí definovat rozhraní mezi nimi. Pro styk mezi vzduchem a lamelou to byl typ „solid/fluid“, pro styk těles vzduchu to byl typ „fluid/fluid“. Ve všech těchto rozhraních byl definován přenos tepla, mezi tělesy vzduchu i přenos hmoty.



Obr. 31 Použité okrajové podmínky při numerické simulaci stávajícího výměníku

Protože celá úloha (viz obr. 31) reprezentuje pouze úzký výřez ze skutečného lamelového bloku, byla na všech bočních, spodních a horních plochách uvažována symetrie, tedy typ okrajové podmínky „symetry“. Jako vstup proudícího vzduchu do úlohy byly definovány plochy na čelní straně přidaných objemových těles před lamelou, typ podmínky „inlet“. Jelikož skutečná vstupní rychlost proudícího vzduchu do výměníku je v různých místech různá, byla hodnota rychlosti volena $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, s ohledem na přibližné průměrné hodnoty rychlostí z naměřených dat. Pro výstup proudícího vzduchu z úlohy byly definovány podmínky „outlet“ na čelní straně přidaných objemových těles za lamelou, s hodnotou relativního tlaku 0Pa.

Složitější situace byla u nastavení okrajových podmínek teploty v jednotlivých trubkách. Ze známého teplotního spádu 70/45°C a ze známé celkové délky trubek v jedné vodní cestě 2700mm (spojovací kolínka na bocích výměníku nebyla uvažována) byl určen teplotní spád 2,1K na polovinu délky trubky rovnu 225mm. Tato vzdálenost odpovídá umístění modelové úlohy, tedy 225mm od okraje výměníku. Jednotlivým trubkám pak odpovídaly příslušné teploty, jejichž hodnoty jsou uvedeny na obr. 32. Příslušné teploty byly nastaveny i v trubkách nad a pod řešenou úlohou viz obr. 38 vlevo.



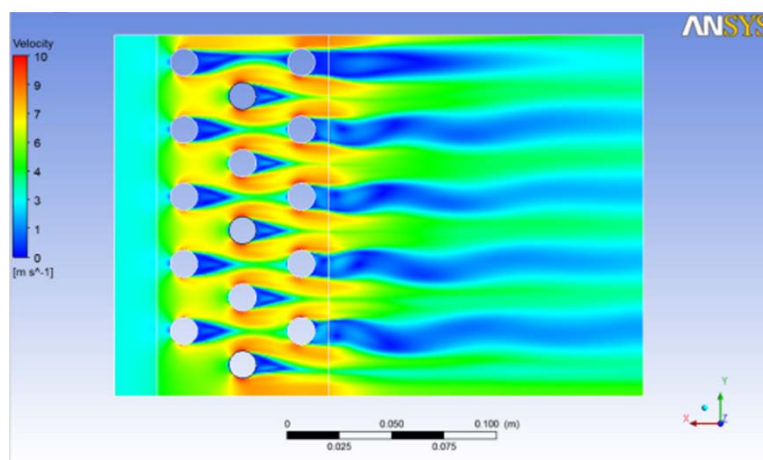
Obr. 32 Schematické znázornění teplot trubek jedné vodní cesty v simulovaném výřezu výměníku

Protože se jednalo o turbulentní proudění s promícháváním proudů, byl nastaven typ turbulentního výpočtového modelu K- ω , počet iterací 100 a hodnota velikosti residua na 0,0001. Před spuštěním výpočtu byla nastavena ještě celková inicializace úlohy.

3.6.4 Výpočet

Úloha byla vypočtena integrovaným řešičem programu CFX. Výpočet byl automaticky ukončen po 69ti iteračních krocích.

3.6.5 Zobrazení výsledků



Obr. 33 Zobrazení výsledků simulací v postprocesoru programu CFX

Po skončení výpočtu byly výsledky zpracovány v integrovaném postprocesoru programu CFX viz obr. 33. Pro zobrazení průběhů rychlostí, teplot a tlaků byly zvoleny teplotní profily v rovinách symetrie lamely a vzduchové mezery, rychlostní a tlakový profil v rovině symetrie vzduchové mezery. Výsledky simulací jsou uvedeny v příloze č. 3.

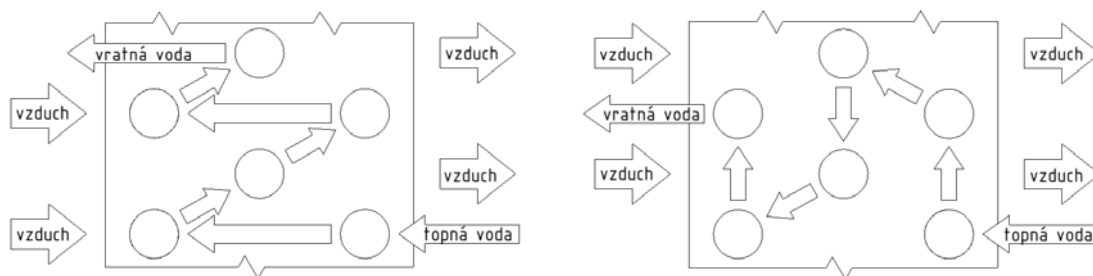
3.7 NÁVRH OPTIMALIZOVANÉ TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY

Pro optimalizaci teplosměnných ploch byl opět zvolen výměník se třemi řadami trubek. Byly navrženy tři varianty optimalizované geometrie teplosměnných ploch, označené dále jako varianty A, B a C

3.7.1 Varianta A

Geometrie této varianty je shodná s geometrií stávajícího výměníku. Rozdíl je však v uspořádání vodních cest, přesněji v pořadí řazení jednotlivých trubek, kterými voda výměníkem protéká. V optimálním případě přenosu tepla by totiž proudění médií ve výměníku mělo být protiproudé, tedy topná voda by měla do lamelového bloku vstupovat trubkou umístěnou nejbližší výstupu vzduchu z výměníku, a naopak by měla vystupovat trubkou umístěnou v místě vstupu vzduchu do výměníku. Rozdíl v pořadí průtoku jednotlivými trubkami mezi stávajícím stavem a optimalizovanou variantou je zřejmý z obr. 34.

Zde stojí za zmínku, že určitou další modifikací by mohlo být provedení vodních cest s průtokem pouze jednou trubkou v každé řadě, tedy pouze třemi trubkami. K tomu by bylo zapotřebí umístit rozváděcí trubku topné vody na opačnou stranu výměníku, než je umístěna sběrná trubka vratné vody, což by vyžadovalo podstatnou změnu konstrukce celé vytápěcí jednotky. Proto tato možnost dále zkoumána nebyla.



Obr. 34 Pořadí průtoku vody vodními cestami – vlevo stávající stav, vpravo varianta A

Konstrukční provedení varianty A by výrobně nebylo nijak náročnější oproti stávajícímu provedení výměníku, propojení jednotlivých trubek navrhovaným způsobem by spočívalo pouze v jiném umístění kolínek, převádějících vodu mezi jednotlivými trubkami na bocích výměníku.

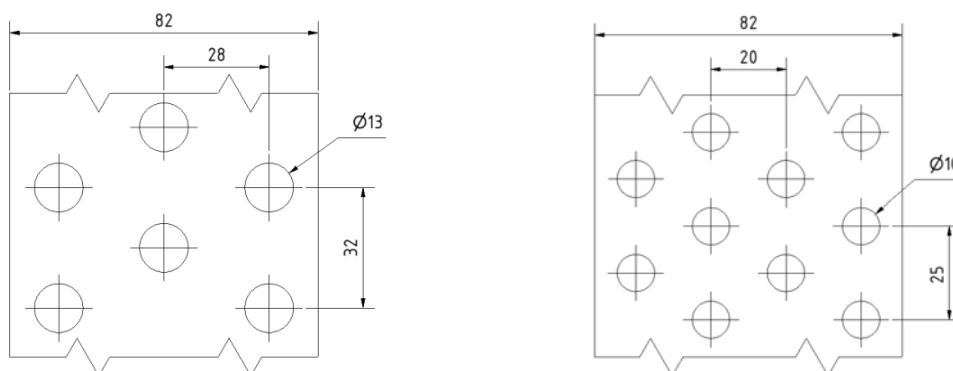
3.7.2 Varianta B

Optimalizace teplosměnných ploch u této varianty spočívala v použití většího počtu trubek o menším průřezu, s hustším rozmístěním na lamelovém bloku, avšak se zachovanou šířkou lamel 82mm. Bylo navrženo použití trubek o průměru 10mm, s roztečí trubek v jedné řadě zkrácenou z 32mm na 25mm. Též i rozteč mezi jednotlivými řadami trubek byla zkrácena z 28mm na 20mm, z čehož dále vyplynula nutnost přidání jedné řady trubek. Stejně tak tím došlo ke zvýšení počtu trubek v jedné řadě z 14 na 18. Přehled rozdílů v geometrii je uveden v tabulce č. 4.

Tab. 4 Porovnání geometrií stávajícího výměníku a optimalizované varianty B

parametr		stávající geometrie	varianta B
šířka lamely	[mm]	82	82
výška lamely	[mm]	450	450
počet řad trubek	[1]	3	4
průměr trubky vnější	[mm]	13	10
průměr trubky vnitřní	[mm]	12	9
počet trubek v řadě	[1]	14	18
počet trubek celkem	[1]	42	72
rozteč trubek v řadě	[mm]	32	25
rozteč řad trubek	[mm]	28	20
vnitřní průřez trubek	[mm ²]	5572	5652
povrch lamely mezi trubkami	[mm ²]	31328	31248

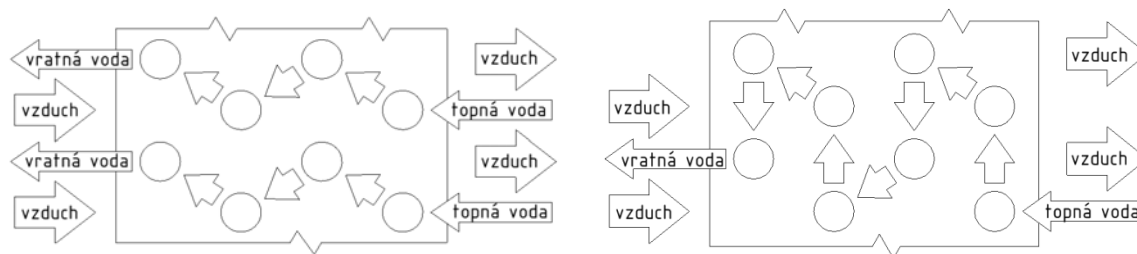
Smyslem návrhu bylo zachování stejného vnitřního průřezu trubek pro uvažovaný stejný průtok topné vody pro přenos tepla do lamelového bloku jako u stávajícího výměníku, při zachování stejné plochy lamel pro přenos tepla z lamelového bloku do vzduchu. Rozdíl mezi geometrií stávajícího výměníku a geometrií varianty B je patrný na obr. 35.



Obr. 35 Porovnání velikosti a rozmístění trubek - vlevo stávající stav, vpravo varianta B

Pro navrženou geometrii se čtyřmi řadami menších trubek s hustším rozmístěním byly dále navrženy dvě varianty způsobu průtoku vody trubkami. Varianta B1 (obr. 36

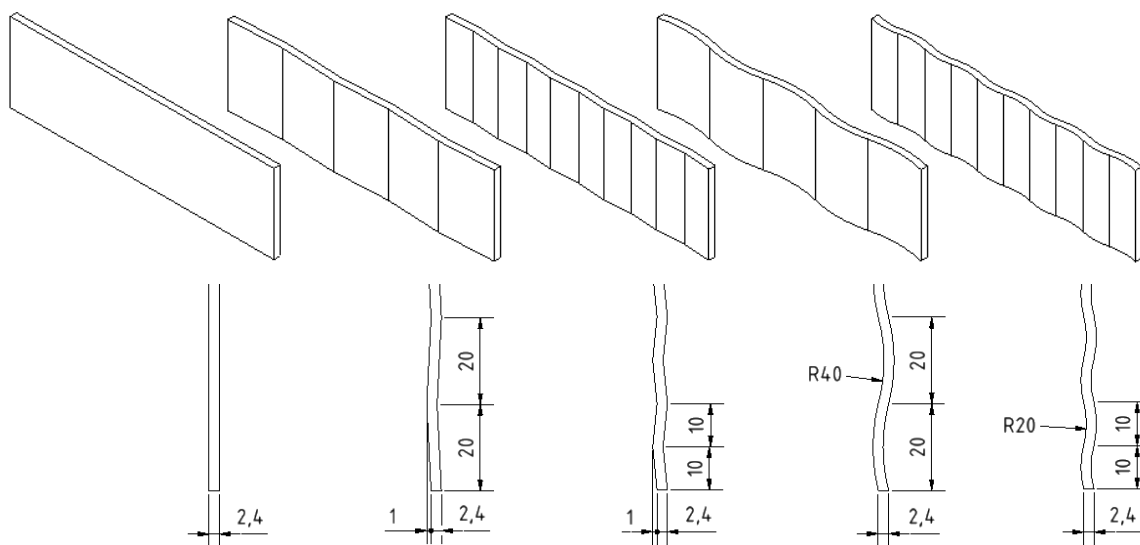
vlevo) měla ve vodní cestě zařazeny čtyři trubky, každou v jedné řadě trubek. Varianta B2 (obr. 36 vpravo) měla ve vodní cestě zařazeno 8 trubek, dvě v každé řadě trubek, podobně jako varianta A, ale ve čtyřech řadách.



Obr. 36 Porovnání vodních cest - vlevo čtyřtrubková B1, vpravo osmitrubková B2

3.7.3 Varianta C

U této varianty byl zcela potlačen vliv velikosti i rozmístění topných trubek, ale byl zde zkoumán pouze vliv příčných zakřivení (zvlnění) lamel na jejich obtékání vzduchem a na přenos tepla z lamel do vzduchu. Jako referenční geometrie byla zvolena stávající vzduchová mezera mezi plochými lamelami. Tato základní geometrie byla označena jako varianta C0. Je třeba zdůraznit, že varianta C0 byla vytvořena pouze pro možnost porovnání, sama o sobě nepředstavuje optimalizovanou teplosměnnou plochu.



Obr. 37 Tvary navržených profilů ve vzduchovém mezilamelovém prostoru – varianty zleva: plochá C0, dlouze lomená C1, krátce lomená C2, dlouze zvlněná C3 a krátce zvlněná C4

Dále byly navrženy již skutečně optimalizované geometrie s krátkým a dlouhým zvlněním lamel, v kombinaci s oblými a ostrými hranami zvlnění. Vznikly tak další čtyři

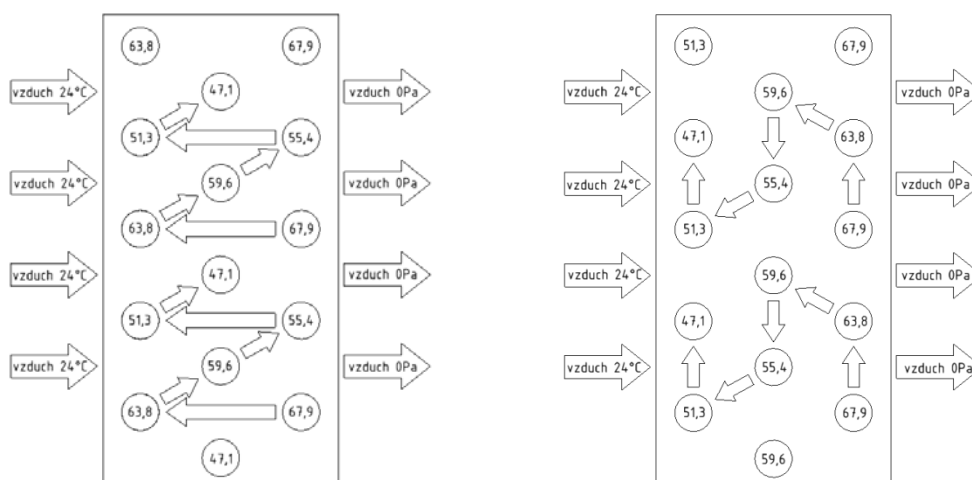
varianty C1, C2, C3 a C4 viz obr. 37. Smyslem simulace bylo porovnat vliv délky a ostrosti zalomení a zvlnění lamel na přenos tepla do okolo proudící vzduchu.

3.8 NUMERICKÉ SIMULACE OPTIMALIZOVANÝCH VARIANT

Numerické simulace nově navržených variant byly opět provedeny v programu CFX. Pro porovnání se stávajícím výměníkem byl uvažován i stejný teplotní spád topné vody 70/45°C a rychlost proudění vzduchu $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Všechny úlohy byly řešeny jako stacionární.

3.8.1 Varianta A

Protože návrh optimalizované varianty A byl přímo odvozen od stávajícího provedení výměníku, byla použita stejná geometrie i vygenerování výpočtových sítí. Odlišnost nastala až při určení okrajových podmínek. Hodnoty teplot jednotlivých trubek u varianty byly sice shodné se stávajícím výměníkem, ale v jiném pořadí, podle nově navržených vodních cest viz obr. 38 vpravo.



Obr. 38 Okrajové podmínky teploty vody a vzduchu, vlevo stávající výměník, vpravo varianta A (čísla v trubkách udávají teplotu vody ve [°C])

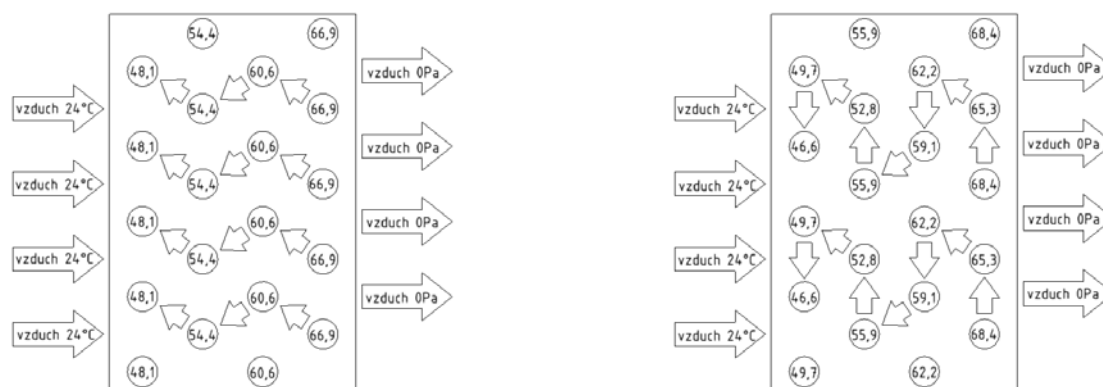
Výpočet provedený řešičem programu CFX se zastavil po 66ti iteracích. Výsledky výpočtu byly opět zpracovány v postprocesoru programu CFX. Pro zobrazení průběhů rychlostí, teplot a tlaků byly zvoleny stejné roviny řezu jako u zobrazení výsledků stávajícího výměníku.

3.8.2 Varianta B

Pro obě varianty B1 a B2 byl použit podobný numerický model, celkově odvozený od varianty A. Geometrie však obsahovala o jednu řadu trubek více, a v každé řadě též o

jednu trubku více. Protože byly trubky menšího průměru, byl při diskretizaci obou úloh snížen počet uzlů na hranách kruhových otvorů představujících trubky. Rozdíl mezi oběma variantami byl v nastavení okrajových podmínek teploty v jednotlivých trubkách. Jejich hodnoty jsou patrné z obrázku č. 39. Stanovení hodnot teploty bylo provedeno obdobným způsobem jako určení teploty trubek pro simulace stávajícího výměníku a varianty A. Pro každou z variant však byly tyto hodnoty teplot nastaveny v jiných trubkách, podle navržených vodních cest.

Výpočet úloh byl opět proveden řešičem programu CFX. Pro variantu B1 byl automaticky ukončen po proběhnutí 84 iterací, pro variantu B2 se zastavil po proběhnutí 87 iterací. Výsledky výpočtu byly opět zpracovány v postprocesoru programu CFX. Pro zobrazení průběhů rychlostí, teplot a tlaků byly opět zvoleny stejné roviny řezu jako u zobrazení výsledků stávajícího výměníku.

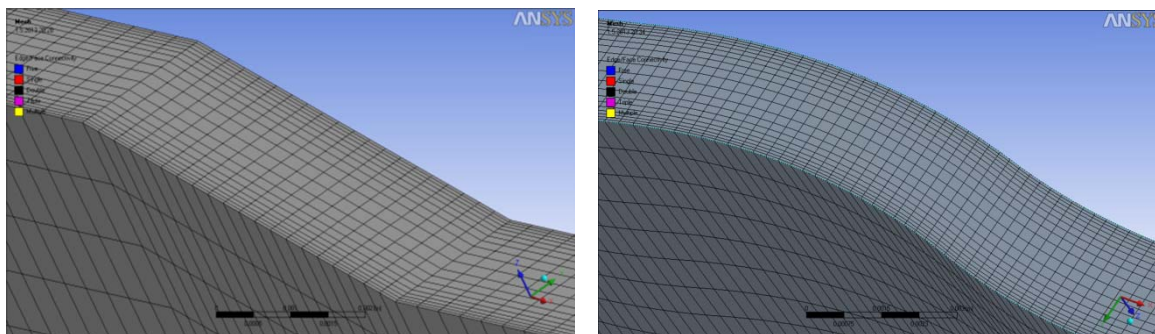


Obr. 39 Okrajové podmínky teploty vody a vzduchu, vlevo varianta B1, vpravo varianta B2
(čísla v trubkách udávají teplotu vody ve [°C])

3.8.3 Varianta C

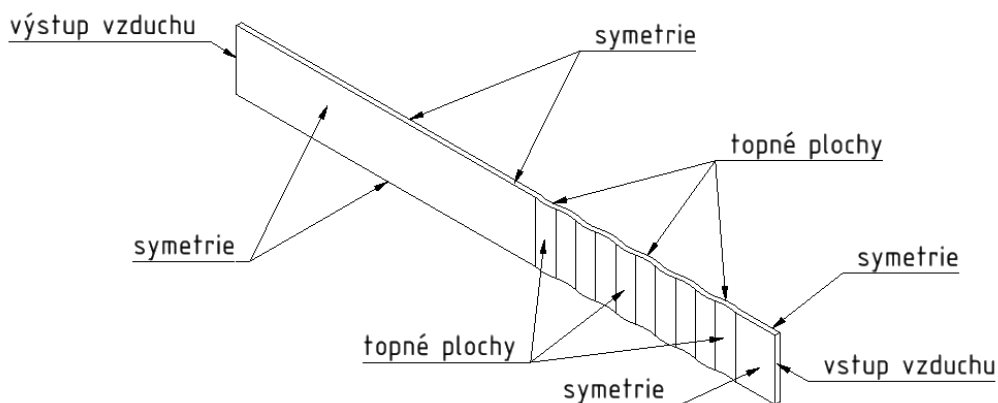
Zde nastal zásadní rozdíl v tvorbě numerických modelů u všech variant C. U referenční varianty C0 byla použita tři plochá tělesa, v podélném směru na sebe těsně navazující. Důvodem k tomu byla potřeba definovat topné plochy pouze na části povrchu, kde byla simulována vzduchová mezera mezi plochými lamelami, ale v tělesech představujících nátok a odtok vzduchu byly boční plochy uvažovány pouze adiabatické. Varianty C1 až C4 byly tvořeny každá jediným tělesem, odlišení topných ploch od adiabatických bylo již možné díky vlastní geometrii mezilamelových prostor. Diskretizace všech úloh byla provedena pomocí šestistěnných elementů, byly definovány počty uzlů na všech hranách, se zhuštěním uzlů u topných ploch, což po vygenerování výpočtové sítě

vytvořilo zhuštění kopírující povrch topných ploch i se všemi zalomeními a zaobleními pro lepší simulaci přenosu tepla v mezní vrstvě u lamely viz obr. 40.



Obr. 40 Diskretizace mezilamelového profilu – vlevo varianta C2, vpravo varianta C4

Nastavení všech úloh spočívalo v definování jediné domény, vzduchu s termofyzikálními vlastnostmi při 25°C, s vlastní inicializací. Určení okrajových podmínek je patrné z obrázku č. 41. Vstupní rychlost vzduchu byla volena opět $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnota výstupního relativního tlaku vzduchu 0Pa. Boční topné plochy představující lamely byly definovány jako stěna „wall“ s teplotou 60°C. U varianty C0 se celá úloha sestávala ze tří těles, bylo zde zapotřebí definovat rozhraní mezi nimi. Pro oba styky to byl typ „fluid/fluid“, s přenosem tepla i hmoty. Ve všech ostatních plochách všech variant byla nastavena symetrie, tedy typ okrajové podmínky „symetry“.



Obr. 41 Použité okrajové podmínky při numerické simulaci všech variant C (zobrazena varianta C4)

Pro nastavení výpočtových modelů byl u varianty C0 zvolen laminární, protože se zde neočekávalo turbulentní proudění, pro ostatní úlohy byl zvolen turbulentní výpočtový model K- ω , protože zde se vlivem zvlnění lamel jednalo již o turbulentní proudění. Počet iterací byl volen na 100 a hodnota velikosti residua na 0,0001. Před spuštěním výpočtu všech úloh byla nastavena ještě celková inicializace.

Výpočty byly opět provedeny řešičem programu CFX. Protože se jednalo o relativně snadnější (v porovnání s variantami A a B) výpočty, byly výpočty automaticky ukončeny po proběhnutí pouhých 34 až 39 iterací.

Výsledky řešení byly opět vizualizovány v postprocesoru programu CFX. Pro zobrazení průběhů rychlostí, teplot a tlaků byla ve všech variantách C zvolena jen jediná rovina, vedená středem mezilamelového prostoru.

Graficky zpracované výsledky numerických simulací variant C jsou uvedeny v příloze č. 3.

3.9 TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ

Protože u variant B1 a B2 bylo navrženo použití trubek o menším průřezu a též jiné uspořádání vodních cest, bylo zapotřebí ještě ověřit, jak se změnily tlakové ztráty při proudění topné vody v potrubí. Přehled parametrů pro výpočet odporu proudění je v tabulce č. 5. Nebyly zde uvažovány výtoky z rozváděcího potrubí ani vtoky do sběrného potrubí, smyslem bylo pouze porovnat tlakové ztráty při průtoku lamelovým blokem.

Tab. 5 Porovnání odporových parametrů optimalizovaných variant A, B1 a B2

veličina	symbol	jednotka	varianta A	varianta B1	varianta B2
průtok topné vody	V	$[\text{l} \cdot \text{s}^{-1}]$	4,48	4,48	4,48
průtok topné vody	V	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	$7,47 \cdot 10^{-7}$	$7,47 \cdot 10^{-7}$	$7,47 \cdot 10^{-7}$
počet vodních cest ve výměníku	n_{VC}	[1]	7	18	9
vnitřní průměr trubky	D_0	[m]	0,012	0,009	0,009
délka jedné trubky	L_{TR}	[m]	0,45	0,45	0,45
počet trubek ve vodní cestě	n_{TR}	[1]	6	4	8
celková přímá délka trubek	L	[m]	2,7	1,8	3,6
počet kolínek v jedné vodní cestě	n_K	[1]	5	3	7
hustota vody při 60°C	ρ_{w60}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	985	985	985
kinematická viskozita vody při 60°C	ν_{w60}	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$
odporový součinitel (dvojitý oblouk)	ξ	[1]	0,5	0,5	0,5

Hodnoty fyzikálních veličin vody čerpány z [6]

3.9.1 TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY A

Střední rychlost proudění topné vody v trubkách:

$$w_{wA} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{wA}}{n_{vCA} \cdot \pi \cdot D_{0A}^2} = \frac{4 \cdot 7,47 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot \pi \cdot 0,012^2} = 0,094 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.2)$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_A = \frac{w_{wA} \cdot D_{0A}}{v_{w60}} = \frac{0,094 \cdot 0,012}{4,5 \cdot 10^{-7}} = 2507 \quad [1] \quad (3.3)$$

Odporový součinitel:

$$\lambda_{TA} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_A}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{2507}} = 0,0447 \quad [1] \quad (3.4)$$

Celková tlaková ztráta v potrubí:

$$\begin{aligned} p_{zA} &= \left(\lambda_A \frac{L_A}{D_{0A}} + n_{KA} \cdot \xi \right) \rho_{w60} \frac{w_A^2}{2} = \\ &= \left(0,0447 \frac{2,7}{0,012} + 5 \cdot 0,5 \right) 985 \frac{0,094^2}{2} = 55 \quad [Pa] \quad (3.5) \end{aligned}$$

3.9.2 TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY B1

Střední rychlost proudění topné vody v trubkách

$$w_{wB1} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{wB1}}{n_{vCB1} \cdot \pi \cdot D_{0B}^2} = \frac{4 \cdot 7,47 \cdot 10^{-5}}{18 \cdot \pi \cdot 0,009^2} = 0,065 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.6)$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_{B1} = \frac{w_{wB1} \cdot D_{0B}}{v_{w60}} = \frac{0,065 \cdot 0,009}{4,5 \cdot 10^{-7}} = 1305 \quad [1] \quad (3.7)$$

Odporový součinitel:

$$\lambda_{TB1} = \frac{64}{Re_{B1}} = \frac{64}{1305} = 0,0491 \quad [1] \quad (3.8)$$

Celková tlaková ztráta v potrubí:

$$\begin{aligned} p_{zB1} &= \left(\lambda_{B1} \frac{L_{B1}}{D_{0B}} + n_{KB1} \cdot \xi \right) \rho_{w60} \frac{w_{wB1}^2}{2} = \\ &= \left(0,0491 \frac{1,8}{0,009} + 3 \cdot 0,5 \right) 985 \frac{0,065^2}{2} = 24 \quad [Pa] \quad (3.9) \end{aligned}$$

3.9.3 TLAKOVÉ ZTRÁTY VARIANTY B2

Střední rychlost proudění topné vody v trubkách:

$$w_{wB2} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{wB2}}{n_{vCB2} \cdot \pi \cdot D_{0B}^2} = \frac{4 \cdot 7,47 \cdot 10^{-5}}{9 \cdot \pi \cdot 0,009^2} = 0,131 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.10)$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re_{B2} = \frac{w_{wB2} \cdot D_{0B}}{\nu_{w60}} = \frac{0,131 \cdot 0,009}{4,5 \cdot 10^{-7}} = 2620 \quad [1] \quad (3.11)$$

Odporový součinitel:

$$\lambda_T = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_{B2}}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{2620}} = 0,0442 \quad [1] \quad (3.12)$$

Celková tlaková ztráta v potrubí:

$$\begin{aligned} p_{zB2} &= \left(\lambda_{B2} \frac{L_{B2}}{D_{0B}} + n_{KB2} \cdot \xi \right) \rho_{w60} \frac{w_{B2}^2}{2} = \\ &= \left(0,0442 \frac{3,6}{0,009} + 7 \cdot 0,5 \right) 985 \frac{0,131^2}{2} = 179 \quad [Pa] \quad (3.13) \end{aligned}$$

3.10 ÚČINNOST VÝMĚNÍKU

Pro úplnost byly u všech variant C ještě vypočteny účinnosti. Byly zde porovnány pouze účinnosti jednotlivých variant geometrie C s maximálním teoretickým (dokonalým) přenosem tepla v nekonečně velkém výměníku, kdy by výstupní teploty vzduchu byla rovna teplotě topných ploch. Vtahy (2.31) a (2.33) proto byly zjednodušeny na výraz

$$\Phi = \frac{t_2 - t_1}{t_T - t_1} \quad [1], \quad (3.14)$$

kde

Φ je účinnost (provozní charakteristika) výměníku,

t_1 je teplota vstupujícího vzduchu,

t_2 je teplota vystupujícího vzduchu,

t_T je teplota topných ploch (lamel).

Teploty pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Porovnání teplot varianty C

veličina	symbol	C0	C1	C2	C3	C4
teplota vstupního vydechů [°C]	t_1	20	20	20	20	20
teplota výstupního vydechů [°C]	t_2	32	35	39	33	37
teplota topných ploch [°C]	t_T	60	60	60	60	60

Potom účinnost varianty C0 je

$$\phi_{C0} = \frac{t_{2C0} - t_1}{t_T - t_1} = \frac{32 - 20}{60 - 20} = 0,300 \quad [1], \quad (3.15)$$

účinnost varianty C1 je

$$\phi_{C1} = \frac{t_{2C1} - t_1}{t_T - t_1} = \frac{35 - 20}{60 - 20} = 0,375 \quad [1], \quad (3.16)$$

účinnost varianty C2 je

$$\phi_{C2} = \frac{t_{2C2} - t_1}{t_T - t_1} = \frac{39 - 20}{60 - 20} = 0,475 \quad [1], \quad (3.17)$$

účinnost varianty C3 je

$$\phi_{C3} = \frac{t_{2C3} - t_1}{t_T - t_1} = \frac{33 - 20}{60 - 20} = 0,325 \quad [1], \quad (3.18)$$

a účinnost varianty C4 je

$$\phi_{C4} = \frac{t_{2C4} - t_1}{t_T - t_1} = \frac{37 - 20}{60 - 20} = 0,425 \quad [1]. \quad (3.19)$$

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Stanovený úkol optimalizace teplosměnných ploch představuje velmi komplexní problém, neboť je třeba zohlednit mnoho různých vlivů, často si vzájemně odporujících. Zhodnocení, jakým způsobem se podařilo vše sladit k dosažení žádaných výsledků je tématem této kapitoly.

4.1 POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Návrh koncepce polohovacího zařízení vycházel ze zkušeností z dřívějších měření. Mezi nejdůležitější požadavky patřila možnost zajištění co možná nejpřesnějšího geometrického umístění sondy žhaveného anemometru v požadovaných polohách na výdechovém průřezu výměníku, a jejich libovolně opakovatelné znovunastavení. Během měření byla ověřena dobrá funkčnost zařízení, nastavování jednotlivých poloh bylo snadné a v požadované přesnosti, což podstatnou měrou přispělo k zpřesnění měření a též k jeho zrychlení.

Požadavek na řádově vyšší počet měřených bodů než v dřívějším měření byl splněn, ze 100 měřených bodů si již lze vytvořit dostatečně jasnou představu o podobě skutečného rychlostního a teplotního profilu.

Přestože měření bylo prováděno jako stacionární proudění, vlivem rotujících lopatek ventilátoru se celá vytápěcí jednotka mírně chvěla. K eliminaci tohoto nežádoucího jevu bylo proto zapotřebí dostatečné tuhosti uložení měřicí sondy. Během měření bylo spolehlivě ověřeno, že konstrukce zařízení je dostatečně tuhá, aby chvění přenášené z konstrukce jednotky na držák sondy anemometru neměly znatelný vliv na výsledky měření.

Další důležitý požadavek na co možná nejmenší vliv zařízení na samotné proudění měřeného vzduchu byl též splněn, jelikož upevnění sondy v držáku bylo dostatečně vzdáleno o místa měření. Do měřeného místa zasahoval pouze vlastní teleskopický držák sondy, což při použití daného anemometru již více eliminovat nelze.

Během měření se navíc ukázalo, že konstrukce zařízení dovolila měřit i v jiné rovině, než původně zamýšlené, čehož bylo využito k měření rychlostních a teplotních profilů v rovinách vzájemně od sebe odsazených o 28mm.

4.2 RYCHLOSTNÍ A TEPLOTNÍ PROFILY VZDUCHU

Při pohledu do grafů naměřených rychlostních a teplotních profilů je zřejmé, že teplota i rychlost vzduchu na výdechu z výměníku jsou rozprostřeny velmi nerovnoměrně. Ačkoli měření principiálně vycházelo z dřívějších měření, a byla proto očekávána i podobná rozložení rychlostních a teplotních profilů, již na první pohled je vidět velké množství maxim a minim hodnot rychlostí i teplot. Proudění vzduchu z výměníku je totiž (kromě polohy ventilátoru) velmi ovlivněno polohou trubek procházejících lamelovým blokem. Jejich vertikální rozteč byla u obou výměníků 32mm, zatímco rozteč měřených bodů byla 45mm. Došlo tak k situaci, že některé měřené body se nacházely před trubkou, tedy v úplavu, jiné body se nacházely před mezerou mezi trubkami, tedy v místě intenzivnějšího proudění vzduchu. Tím vznikla ona minima a maxima rychlostí. Tomu odpovídá i rozložení maxim teplot přibližně v místech minim rychlostí a naopak. Zde však hraje svou roli ještě další faktor, a tím je uspořádání vodních cest, zejména třířadého výměníku. Není zde totiž dodržena obecná zásada protiproudé koncepce výměníku, kdy by měla topná voda vstupovat do lamelového bloku trubkou umístěnou nejbližší výstupu vzduchu a vystupovat naopak trubkou nejbližší vstupu vzduchu. Nicméně i tak je zřetelné, že maxima rychlostí se nacházejí přibližně v kruhu, tedy v místech rotace lopatek axiálního ventilátoru. Stejně tak maxima teplot se nacházejí přibližně uprostřed obrazce, kde je proudění slabší.

Pokud porovnáme data mezi měřeními v bližší a vzdálenější rovině od lamelového bloku, tak i ve vzdálenější rovině je patrný výše popsáný efekt proudění, tedy minima teplot v místech maxim rychlostí a naopak, nicméně proudění je zde již o něco více rozptýleno a tak rozdíly mezi maximy a minimy jsou o něco méně výrazné.

Zde je potřeba upozornit na to, že při nastavení teplotních spádů bylo cílem dosáhnout stejných podmínek, za jakých byly výměníky měřeny ve výše uvedené bakalářské práci, aby bylo možno výsledky lépe porovnat. Skutečnost však byla taková, že se podařilo nastavit jen některé teplotní spády, většinu však nikoli. Příčinou toho nejspíš byly samotné výměníky. Původní výměníky, pocházely od jiného výrobce (GEA) než nyní měřené výměníky (JANKA). Jejich konstrukce byla sice na první pohled shodná, při bližším zkoumání však byly zjištěny určité odlišnosti v geometrii, a to jednak průměr trubek zvětšený o 0,8mm, u třířadého výměníku pak i zvýšený počet trubek ze 40 kusů na 42, a z toho nutně plynoucí jiné uspořádání vodních cest. Pro lepší objektivitu by bylo lepší

měřit podrobnějším 100 bodovým měřením i výměníky původní konstrukce, to však již není možné z důvodu ukončení jejich výroby.

4.3 CHYBY MĚŘENÍ

I přes snahu docílit co největší přesnosti při měření vyloučením různých rušivých vlivů došlo k určitým nepřesnostem. Tak jako všude jinde i zde totiž došlo k tepelným ztrátám, které tvoří především volná konvekce okolo rozdělovačů a sběračů topné vody, okolo vratných kolínek na bocích výměníku, ztráta vedením tepla do rámu výměníku, dále ztráta sáláním tepla do okolí.

Samotné měření bylo provedeno v poměrně velkém počtu měřených bodů, což pozitivně ovlivnilo celkové výsledky. Způsob upevnění sondy a poměrně přesné nastavení požadované polohy se též pozitivně projevil na kvalitě naměřených hodnot.

Naopak negativně zapůsobila skutečnost, že v měřených rovinách před výdechovým otvorem výměníku nebylo proudění ještě zdaleka dostatečně ustálené a velmi záleželo na tom, zda je konkrétní měřený bod v proudu vzduchu mezi trubkami nebo v úplavu za trubicí. Tuto skutečnost potom potvrdily i výsledky numerických simulací. Dalším faktorem byla určitá nestacionarita proudění vzduchu při nátoky z ventilátoru na výměník, rázy způsobené lopatkami ventilátoru, i když se celá úloha považovala za stacionární.

U dvouřadého výměníku navíc vlivem výrobní vady v podobě mírného ohnutí části lamel došlo k nežádoucímu směřování proudění mimo měřenou zónu a tím ke zkreslení výsledků měření v těchto místech.

Při měření teploty topné a vratné vody bylo použito zdvojených termoelektrických teploměrů, a při kontinuálním vyhodnocování pomocí multifunkčního převodníku ADAM docházelo k odchylkám mezi hodnotami teplot naměřenými oběma čidly v jedné dvojici v řádu maximálně několika desetin K, což je pro danou úlohu naprosto dostačující výsledek. Tato odchylka totiž sama o sobě ještě nemusela být nutně chybou, ale mohla být způsobena jen nestejnou teplotou trubky, kde vlivem vnitřního proudění topné vody nutně muselo docházet k určitým malým rozdílům v teplotě vnějšího povrchu trubek.

Ve skutečném výměníku jsou trubky složené válcovou stěnou, tvořenou měděnou trubicí a hliníkovým nákrůžkem lamely, kde dochází k přechodovému odporu při vedení tepla mezi oběma materiály. Když je při výrobě snaha tento odpor eliminovat mechanickým vlisováním trubek do navlečených lamel, i přesto vlivem přítomnosti oxidů

kovů na površích spojovaných součástí může být přechodový odpor znatelný. Bez destrukce lamelového bloku však nelze spolehlivě prokázat skutečný vliv tohoto odporu na přenos tepla

4.4 NUMERICKÉ SIMULACE

Při tvorbě všech výpočtových modelů došlo k určitým zjednodušením geometrie i některých okrajových podmínek teplot a symetrií. Výsledky numerických simulací i tak jasně ukazují, že stávající provedení výměníku voda-vzduch vytápěcí jednotky Sahara není ideální. Nejlépe je to vidět na teplotním profilu, zobrazeném v rovině symetrie vzduchové mezilamelové mezery. V místech úplavů za poslední řadou trubek se za trubkami střídají pásy více a méně ohřátého vzduchu. Velmi podobný jev je patrný i ze zobrazení teplotního profilu v rovině symetrie lamely. Zde je navíc z rozložení teplot na samotné lamele vidět, že vzduch obtéká nejprve teplejší trubku v první řadě trubek, a od ní potom proudí k chladnější trubkám. Je to jasné potvrzení nesprávně navržené konstrukce vodních cest, kdy není respektován základní princip protiproudého uspořádání toku obou médií výměníkem. Je tím současně i potvrzeno rozložení teplot v teplotním profilu naměřeném na výdechu z výměníku, kde jsou viditelné obdobné pásy více a méně ohřátého vzduchu. Pouhou změnou pořadí průtoku jednotlivých trubek topnou vodou ve vodních cestách bylo u varianty A dosaženo znatelně stejnoměrnějšího rozložení teplot ve vzduchu opouštějícím výměník, kdy jsou proudy teplejšího vzduchu širší a navíc je celkové rozložení teplot mnohem stejnoměrnější než u stávajícího provedení. Celkově vyšší teplota vzduchu vystupujícího z výměníku u varianty A svědčí o lepším přenosu tepla. Protože praktická realizace optimalizace by nebyla o nic náročnější než je stávající výrobní technologie, optimalizovat výměník tímto způsobem by rozhodně mělo smysl.

Podobná situace je znatelná i z výsledků numerických simulací variant B1 a B2. Zde se v obou případech vzduch procházející výměníkem předeřívá trubkami s vratnou vodou a od nich proudí k trubkám se stále teplejší topnou vodou. Díky tomuto uspořádání výměníku je rozložení teplot v teplotních profilech vzduchu odcházejícího z výměníku u obou variant stejnoměrné. V porovnání s variantou A je navíc ještě znatelně stejnoměrnější, jednoznačně vlivem geometrie s hustějším umístěním trubek o menším průměru.

Při pohledu na rychlostní profily není znatelný rozdíl mezi stávajícím výměníkem a variantou A. Je to pochopitelné, jelikož geometrie je v obou případech shodná. V obou rychlostních profilech jsou jasně viditelné pásy proudícího vzduchu s menší rychlostí v úplavech za trubkami, které se střídají s pásy rychlejších proudů vzduchu mezi trubkami. I zde je tak současně potvrzeno rozložení rychlostního profilu, naměřené na výdechu z výměníku, kde jsou viditelné obdobné pásy rychlejšího a pomalejšího proudění. U obou variant B1 a B2 jsou rychlostní profily taktéž prakticky shodné z důvodu shodné geometrie. Z barevných spekter rychlostí variant A a B je patrné, že rychlosti dosahují ve stejných místech srovnatelných hodnot, tedy především v úplavech a mezitrubkových prostorech, což svědčí o dobré vyváženosti velikostí mezitrubkových prostor vzhledem ke zlepšenému přenosu tepla. Není tomu tak na úkor zvýšené rychlosti a tím zvýšení tlakové ztráty, což je patrné i z rozložení tlakových spádů, kde jsou hodnoty tlakových ztrát ve stejných místech variant A a B srovnatelné.

Při porovnání teplotních polí variant B1 a B2 mezi sebou je však zřejmé, že složitější osmitrubková vodní cesta varianty B2 nepřináší žádný podstatný efekt zlepšeného přestupu tepla oproti variantě B1 se čtyřtrubkovou vodní cestou. Vzhledem k tomu, že tlakové ztráty na straně proudící topné vody jsou více než sedmkrát vyšší než ztráty varianty B1, bylo by v praxi výhodnější provedení dle varianty B1.

Pokud se podíváme na výsledky numerických simulací všech variant C, pak zjistíme, že profilování povrchu lamel a tím i mezilamelového prostoru má zásadní význam na přenos tepla konvekcí. Referenční plochá lamela varianty C0 je v tomto ohledu nevhodná. Dvě takovéto lamely tvoří mezilamelový prostor s hladkými stěnami, kde se vytvoří laminární proudění, s maximem rychlosti v podélné středové rovině, a s mezní vrstvou na povrchu lamel, bránící požadovanému sdílení tepla. U skutečných výměníků tomu tak ovšem není, protože tam dochází k turbulentním vlivem obtékání svazku trubek, procházejících lamelovým blokem. Jako modelový příklad sloužící pro porovnání vlivu jen samotného tvaru povrchu lamel však bylo vytvoření varianty C0 nezbytné.

Při porovnání s teplotním profilem varianty C1, kde byla použita geometrie s lomením o délce 20mm, je na rozložení teplot znatelné jen minimální zvýšení teploty vzduchu za lamelou. Nedochozí zde tedy k dostatečným změnám směru proudu a tím k dostatečně velkému turbulentnímu proudění, nutnému pro požadovaný přenos tepla konvekcí. Teplotní profil varianty C2, kde byla použita lomení o délce 10mm již jasně

ukazuje zlepšení přenosu tepla, vzduch odcházející z mezilamelového prostoru je znatelně teplejší než v případě varianty C1. Zkrácená zalomení tak již lépe vytvářejí turbulentní proudění. Obdobné výsledky přineslo použití dlouhých a krátkých zaoblení lamely u variant C3 a C4. Zaoblení o délce 20mm u varianty C3 dosahuje u teplotního profilu srovnatelných výsledků jako geometrie varianty C1. U varianty C4 bylo použita zaoblení o délce 10mm oproti variantě C3. Výsledný přenos tepla zde však nedosahuje hodnot obdobné geometrie varianty C2, protože teplota vzduchu opouštějícího mezilamelový prostor je chladnější než teplota ve stejných místech u varianty C2. Stejně tak je ale přenos tepla u varianty C4 lepší než u varianty C1.

V rychlostním profilu varianty C0 je zřetelné zvýšené proudění středem kanálu, s mezními vrstvami při povrchu lamel. U variant C1 až C4 dosahuje rychlost maxim při obtoku jednotlivých vnějších zalomení a zaoblení mezilamelového kanálu, naopak u vnitřních zalomení a zaoblení je rychlost proudění nižší. Tento jev je výraznější u kratších zalomení a zaoblení. Na výstupu z kanálu u všech variant není v hodnotách rychlostí proudění znatelný žádný rozdíl, stejně jako mezi rychlostí na vstupu do kanálu a výstupem z kanálu.

Při pohledu na zobrazení tlakových ztrát je obdobně znatelný pokles tlaku v místě vnějších zalomení a zaoblení, které středová rovina zobrazení těsně mívá. Jelikož při nastavení okrajových podmínek numerických simulací bylo jako nulový relativní tlak zvoleno místo výstupu vzduchu na konci tělesa, tlak proto stoupá směrem k počátku, aby překonal ztráty proudění při průtoku mezilamelovým kanálem. Jasně je tak potvrzena vyšší účinnost přenosu tepla u varianty C2, kde je největší tlaková ztráta k vyrovnání zvýšeného odporu proudění krátkými zalomeními v mezilamelovém kanálu. O něco menší tlaková ztráta je patrná na tlakovém rozložení u varianty C4 s krátkými zaobleními. Pak již následují těsně za sebou všechny zbývající varianty v pořadí účinnosti C1, C3 a C0.

Celkově lze říci, že z výše popsaných výsledků by ideální optimalizovaná varianta byla kombinace uspořádání trubek podle varianty B1 s tvarováním mezilamelového prostoru podle varianty C2.

5 ZÁVĚR

Tato práce studovala měření výkonových charakteristik vytápěcí jednotky SAHARA a optimalizaci teplosměnných ploch výměníku voda-vzduch. Pro zkoumání byla zvolena jednotka nejmenší konstrukční velikosti. Pro měření rychlostních a teplotních profilů byly lamelové výměníky typu voda/vzduch se dvěma a třemi řadami trubek, a třírychlostní axiální ventilátor.

Před měřením bylo podle zadaného úkolu zkonstruováno polohovací zařízení pro měření teplotních a rychlostních polí výdechového otvoru vzduchotechnického výměníku voda/vzduch. Konstrukce zařízení byla provedena s ohledem na dostupné technologie zpracování plechu. Dále byla provedena výroba zkonstruovaných součástek, a na závěr byla provedenou montáží ověřena smontovatelnost a funkčnost zařízení. Požadované polohy na zvolených (měřených) polích výměníku bylo možno nastavit a zajistit s odpovídající přesností, snadno, rychle a opakovatelně, a počet měření se tak zvýšil oproti původnímu stavu více než 6 krát.

Měření rychlostních a teplotních profilů bylo prováděno při různých teplotních spádech a různých rychlostech proudění topné vody i ohřívaného vzduchu. V každé měřené kombinaci byl nastaven teplotní spád topné vody a rychlost proudění vzduchu, na jejichž základě byly pomocí žhaveného anemometru měřeny rychlost a teplota ve 100 místech výdechového průřezu výměníku. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že teplota ani rychlost vzduchu na výstupu z výměníku nejsou rovnoměrně rozprostřeny, ale jsou velmi ovlivněny umístěním ventilátoru. Díky tomu jsou maxima rychlostního profilu přibližně v kruhu, který odpovídá umístění rotujících lopatek ventilátoru. Průběhy teplot pak mají svá maxima poblíže středu výměníku, a jsou mírně posunutá k levému dolnímu rohu. Průběhy rychlostí i teplot jsou velmi ovlivněny polohou trubek v lamelovém bloku výměníku, kde velmi záleželo na tom, zda se měřicí sonda nacházela v proudu vzduchu mezi trubkami nebo v úplavu za trubkou.

Byla provedena numerická simulace stávajícího výměníku se třemi řadami trubek. Úloha byla řešena ve 3D numerickém modelu, kde byl zvolen výřez z lamelového bloku výměníku. Okrajové podmínky byly voleny s ohledem na jednu z měřených variant. Byl zjištěn zásadní nedostatek v konstrukci stávajícího výměníku, kde pořadí průtoku

jednotlivými trubkami vodních cest neodpovídá protiproudé koncepci, zaručující nejlepší možný přestup tepla mezi toky obou médií výměníkem.

V další části práce byla řešena optimalizace teplosměnných ploch pomocí numerických simulací. Bylo navrženo několik variant řešení. Varianta A spočívala v jiném pořadí průtoku topné vody trubkami při jinak nezměněné geometrii lamel. Toto řešení se dle výsledků numerických simulací ukázalo být výhodnější než stávající stav. Dále byla navržena varianta B s větším počtem menších trubek, rozmístěných v lamelovém bloku s kratšími roztečemi, přičemž byly zkoumány dvě další varianty řešení vodních cest, a to se čtyřmi a s osmi trubkami. Numerické simulace obou řešení prokázaly zlepšení stejnoměrnosti teploty ohřívaného vzduchu a tím zlepšení přenosu tepla oproti stávajícímu stavu. V práci byla zkoumána též účinnost profilace povrchu lamel, kdy bylo navrženo zdeformování plochých lamel krátkými a dlouhými zalomeními, a též krátkými a dlouhými zaobleními. Numerické simulace všech těchto profilů prokázaly jako nejúčinnější řešení s krátkým zalomením. Jen o málo horší výsledek dosáhla varianta s krátkým zaoblením. Dlouhá zalomení a zaoblení podstatný vliv na přenos tepla neměla.

Na závěr je třeba zmínit fakt, že všechna výše popsaná zkoumání a optimalizace byla provedena za určitých zjednodušení reálných stavů, kdy nebylo uvažováno nerovnoměrné proudění od ventilátoru k výměníku, a též nebyly uvažovány různé ztráty sdílením tepla do okolí. I tak ale bylo prokázáno několik možností zlepšení stávajícího výměníku typu voda-vzduch.

Pro další výzkum lze doporučit navržení dalších optimalizací geometrie lamel, především v návaznosti na připojené procházející trubky, okolo kterých je přenos tepla významnější.

Jako doporučení pro výrobce výměníků by bylo dobré realizovat řešení dle varianty A, které nevyžaduje žádné další investice. Dobré by bylo zvážit i ostatní navrhované možnosti zlepšení.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIENHARD, J. H. IV., LIENHARD, J. H. V.: *A Heat Transfer Textbook* [online]
[cit. 14. 4. 2013] Dostupné na World Wide Web: <
<http://alexandria.tue.nl/extra2/boek/ahttv122.pdf>>
- [2] JÍLEK, M., RANDA, Z.: *Termomechanika*. 1.vyd. Praha, ČVUT, 2004. 168 s.
ISBN 80-01-03107-1.
- [3] SZEKYOVÁ, M., FERTEL, K., NOVÝ, M.: *Větrání a klimatizace*. 1. České vyd.
Bratislava, Jaga group, s.r.o. 2006. ISBN 80-8076-037-3.
- [4] VONDRÁČEK, V., STŘEDA, I., MAMULA, V., HLINKA, M.: *Mechanika
tekutin a termomechanika*. 1.vyd, Praha, SNTL, 1977, 256s. ISBN 04-225-77.
- [5] ŠESTÁK, J., RIEGER, F.: *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha, ČVUT, 2005.
299 s. ISBN 80-01-02933-6.
- [6] ŘASA, J., ŠVERCL, J.: *Strojnické tabulky I*. Praha, Scientia, 2004, 753s. ISBN 80-
7183-312-6
- [7] OGDEN, T. R.: *Thermal Conductivity of Hard Anodized Coatings on Aluminium*,
23rd Joint Propulsion Conference, San Diego, California, June 29-July 2, 1987
- [8] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol.: *Větrání a klimatizace*. 3.vydání, Praha, Česká
matice technická, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [9] BLEJCHAŘ, T.: *Návody do cvičení "Modelování proudění" – CFX*, Ostrava,
Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2009, ISBN 978 - 80 - 248 - 2050 - 7
- [10] JENČÍK, J., VOLF J. a kol.: *Technická měření*, Vydavatelství ČVUT, 2000, ISBN
80-01-02138-6
- [11] ŽHAVENÝ ANEMOMETR TESTO 425 [online] [cit. 19.4.2013] Dostupné na
World Wide Web: [http://www.testo.cz/online/abaxx-?\\$part=PORTAL.CZE.
SectorDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=4694124](http://www.testo.cz/online/abaxx-?$part=PORTAL.CZE.SectorDesk&$event=show-from-menu&categoryid=4694124)
- [12] PROJEKČNÍ DATA VYTÁPĚCÍ JEDNOTKY WOLF
- [13] PROJEKČNÍ DATA VYTÁPĚCÍ JEDNOTKY SAVANA
- [14] PROJEKČNÍ DATA VYTÁPĚCÍ JEDNOTKY LEO
- [15] PROJEKČNÍ DATA VYTÁPĚCÍ JEDNOTKY SAHARA MAXX
- [16] BULÍŘ, P.: *Výkonové charakteristiky vytápěcí jednotky Sahara*, Bakalářská práce,
Liberec, TU Liberec, 2010

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1

Naměřené hodnoty rychlosti a teploty výdechového vzduchu, hodnoty dílčích výkonů, zobrazení rychlostních a teplotních profilů.

Příloha č. 2

Porovnání naměřených hodnot rychlosti a teploty výdechového vzduchu, rychlostních a teplotních profilů výměníků výrobce JANKA s hodnotami naměřenými na výměnících výrobce GEA, použitých v bakalářské práci.

Příloha č. 3

Grafické znázornění výsledků numerických simulací stávajícího třířadého výměníku a optimalizovaných variant A, B a C.

Příloha č. 4

Kusovník a výkresová dokumentace polohovacího zařízení.

Příloha č. 1

Tabulky naměřených rychlostí, teplot a vypočtených dílčích výkonů v jednotlivých polích

Varianta 1:

2 řady trubek, 1. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 60/50°C, průtok 7,41 l/min

Rovina měření 64mm od lamel

J	0,5	1,3	2,3	1,8	1,9	2,2	1,9	2,1	1,5	1,3
	31,7	35,1	35,2	34,5	35,5	35,6	35,7	34,8	34,9	37,9
	7,5	29,9	53,4	38,9	45,4	53,0	46,2	46,8	33,8	38,1
I	0,6	1,6	2,2	2,0	2,3	2,0	1,9	2,4	1,3	1,4
	30,5	34,8	34,7	35,6	35,5	35,4	34,4	35,1	35,3	37,8
	7,1	35,7	48,5	48,2	54,9	47,3	40,6	55,1	30,5	40,8
H	0,5	1,9	2,0	1,6	1,6	1,9	1,9	2,0	1,7	1,6
	29,8	35,4	36,7	36,7	36,6	36,8	35,8	36,6	36,3	37,1
	4,9	44,9	53,2	42,6	42,2	51,0	46,7	52,8	43,7	44,0
G	0,4	1,4	1,2	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
	29,8	35,0	36,2	37,9	37,2	38,4	35,2	35,0	34,6	34,7
	4,5	31,8	30,6	41,1	36,1	33,5	27,8	27,3	26,2	28,7
F	0,5	1,7	2,0	1,2	1,2	1,0	1,5	2,0	2,4	2,3
	29,8	35,8	38,8	38,9	39,1	38,7	38,8	37,0	36,4	36,2
	5,7	41,8	62,8	37,9	38,5	31,2	47,1	54,6	62,2	58,6
E	0,5	1,4	1,6	1,0	1,1	0,8	1,2	1,4	1,2	1,2
	30,2	36,6	37,5	39,1	39,2	38,8	39,0	38,3	38,0	37,2
	5,4	36,9	45,5	32,1	35,5	25,1	38,2	42,4	35,5	33,3
D	0,7	1,9	2,2	1,2	1,3	1,2	1,4	1,8	2,2	2,1
	31,1	37,3	37,7	38,8	39,3	39,0	37,0	36,2	36,0	36,2
	9,7	53,2	63,6	37,7	42,3	38,2	38,2	45,9	55,0	53,5
C	1,8	2,2	2,0	2,0	1,7	1,6	1,8	1,9	1,7	1,2
	38,1	37,7	37,8	37,9	38,3	37,5	37,5	37,2	36,9	33,7
	53,6	63,6	58,2	58,7	51,4	45,5	51,2	52,7	46,0	23,7
B	1,4	1,8	2,1	1,9	2,2	1,9	2,2	2,0	1,8	1,5
	38,4	37,3	36,9	37,8	37,9	37,7	37,5	37,0	34,9	34,6
	42,7	50,4	56,8	55,3	64,6	54,9	62,6	54,6	40,5	32,8
A	1,2	1,4	1,6	1,3	1,2	1,2	1,2	1,4	1,2	1,4
	39,0	38,6	39,4	39,0	38,6	37,8	38,7	37,8	35,8	36,2
	38,2	43,3	52,4	41,4	37,1	34,9	37,4	40,8	29,5	35,7
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 92mm od lamel

J	0,4	1,3	2,2	1,7	1,8	1,9	1,7	1,9	1,4	1,3
	30,7	36,1	36,0	35,6	35,9	35,9	36,2	35,7	35,8	37,2
	5,2	32,8	55,0	41,0	44,6	47,1	43,3	46,2	34,4	36,1
I	0,5	1,5	2,0	1,8	2,1	1,9	1,8	2,1	1,4	1,5
	30,0	35,7	35,6	36,1	35,8	35,8	35,5	35,9	36,0	36,9
	5,7	36,5	48,2	45,4	51,6	46,7	43,0	52,1	35,0	40,6
H	0,4	1,8	1,8	1,5	1,6	1,8	1,7	1,8	1,6	1,4
	29,4	36,3	36,6	36,5	36,5	36,6	36,0	36,5	36,2	35,2
	4,0	46,3	47,5	39,2	41,9	47,5	42,5	47,1	40,8	32,5
G	0,4	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,5	1,3	1,4
	28,8	36,1	36,3	38,2	37,8	38,5	35,7	36,1	35,3	37,3
	3,5	35,3	38,6	45,0	40,8	36,9	31,6	37,9	30,5	39,2
F	0,5	1,6	1,8	1,2	1,1	1,0	1,5	1,8	2,1	2,0
	29,2	36,1	38,6	39,0	39,0	38,6	38,7	36,9	36,6	36,3
	5,0	40,4	55,7	38,2	35,0	30,9	46,7	48,7	55,4	51,4
E	0,4	1,4	1,5	1,1	1,1	0,9	1,2	1,5	1,3	1,3
	29,0	36,4	37,6	38,9	39,3	38,7	38,8	37,7	37,4	37,1
	3,6	36,3	43,0	34,8	35,8	28,0	37,7	43,3	36,7	35,8
D	0,6	1,8	2,0	1,2	1,2	1,3	1,4	1,7	2,0	1,9
	32,1	37,1	37,5	38,6	39,4	38,8	37,9	36,4	36,2	36,4
	9,7	49,5	56,9	37,1	39,3	40,8	41,1	44,1	51,0	49,3
C	1,7	2,2	2,0	1,9	1,6	1,5	1,7	1,7	1,6	1,1
	37,6	37,2	37,5	37,2	37,6	36,9	37,1	37,0	36,7	32,7
	48,7	61,1	56,9	52,7	45,9	40,6	46,8	46,4	42,6	19,3
B	1,4	1,7	1,9	1,8	2,0	1,8	2,0	1,8	1,7	1,5
	37,7	37,1	37,0	37,1	37,2	37,1	37,2	36,9	35,8	35,3
	40,4	46,8	51,9	49,5	55,5	49,5	55,5	48,7	41,8	35,1
A	1,3	1,5	1,5	1,3	1,4	1,3	1,3	1,5	1,3	1,3
	37,9	38,0	38,6	37,9	37,7	37,2	38,1	37,3	35,6	36,6
	38,1	44,4	46,4	38,1	40,4	36,1	38,7	42,0	31,3	34,3
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Varianta 2:

2 řady trubek, 2. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 55/45°C, průtok 7,69 l/min

Rovina měření 64mm od lamel

J	0,7	1,8	2,6	2,5	2,6	3,1	2,6	2,7	1,9	1,5
	27,7	31,5	31,5	30,6	31,4	31,6	31,0	30,1	30,2	31,4
	5,5	30,7	44,4	37,5	43,8	53,6	41,4	37,5	26,8	25,2
I	0,9	2,0	2,8	2,7	3,2	2,7	2,6	2,7	1,9	1,4
	27,5	30,1	29,9	30,8	31,4	31,3	30,4	31,4	31,4	31,8
	7,2	27,8	37,6	41,8	53,9	44,8	37,9	45,4	32,0	24,8
H	0,7	2,4	3,1	2,2	2,5	2,6	2,7	3,0	2,4	2,0
	26,8	31,0	32,4	32,3	32,3	31,6	31,2	31,7	32,2	31,1
	4,1	38,2	59,2	41,5	47,2	44,9	44,2	52,5	44,8	32,3
G	0,6	2,0	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	1,9	1,9	2,4
	26,8	30,9	31,5	33,1	31,9	33,0	30,9	30,7	30,8	32,4
	3,9	31,4	35,8	43,5	37,7	40,9	33,0	29,0	29,4	45,9
F	0,7	2,1	2,7	2,1	1,9	1,7	1,9	2,4	3,2	2,9
	26,8	31,1	33,5	33,8	34,1	33,4	32,7	32,8	32,2	31,4
	4,6	33,9	58,3	46,8	43,7	36,4	37,6	48,0	59,7	48,8
E	0,9	2,2	2,2	1,9	1,7	1,4	1,7	2,3	1,9	2,2
	27,2	30,3	32,4	34,2	34,2	33,7	33,4	33,5	32,8	31,9
	6,3	31,5	42,0	44,1	39,4	30,9	36,4	49,7	38,0	39,5
D	1,3	2,2	2,5	2,1	2,3	2,0	2,1	2,6	3,3	2,8
	28,1	32,0	33,6	33,8	33,8	33,4	32,6	31,1	31,1	31,5
	11,8	40,0	54,6	46,8	51,3	42,8	41,1	42,0	53,3	47,8
C	2,5	3,1	3,0	2,7	2,5	2,7	3,1	3,3	2,2	1,5
	32,9	33,2	32,4	32,7	33,4	33,1	33,0	32,4	31,4	29,7
	50,6	64,9	57,3	53,4	53,5	55,9	63,5	63,1	37,0	18,9
B	1,8	2,5	3,0	2,4	2,3	2,0	2,3	2,5	1,9	1,7
	33,0	32,8	33,1	32,7	32,3	31,8	33,0	32,2	30,0	30,6
	36,9	50,0	62,1	47,5	43,4	35,5	47,1	46,6	25,9	25,2
A	1,4	2,0	2,4	2,1	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,4
	33,6	34,2	34,4	33,8	33,1	33,3	33,5	32,0	30,9	28,2
	30,6	46,4	56,8	46,8	43,5	42,3	43,2	34,6	29,8	13,0
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 92mm od lamel

J	0,6	1,8	2,3	2,2	2,5	2,9	2,3	2,4	1,9	1,6
	27,1	31,6	31,5	31,2	31,7	31,6	32,0	30,5	30,5	31,6
	4,2	31,1	39,2	36,0	43,8	50,1	41,9	35,5	28,1	27,7
I	0,8	2,0	2,5	2,4	3,1	2,6	2,3	2,4	1,9	1,6
	27,2	30,4	30,6	32,1	31,5	31,6	31,2	31,6	31,7	32,1
	5,8	29,1	37,5	44,2	52,9	44,9	37,7	41,5	33,3	29,5
H	0,6	2,2	2,8	2,2	2,3	2,4	2,4	2,7	2,3	2,0
	26,3	31,3	32,0	32,4	32,4	31,7	31,3	31,8	32,3	31,5
	3,1	36,5	51,0	42,0	43,9	42,0	39,9	47,9	43,4	34,1
G	0,6	2,0	2,0	2,2	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	2,2
	26,5	31,2	31,7	32,8	32,1	32,8	31,0	30,9	30,8	32,3
	3,5	32,8	35,0	44,0	36,9	40,0	31,8	29,8	29,4	41,5
F	0,6	2,1	2,5	2,1	1,9	1,7	1,9	2,2	2,9	2,7
	26,6	31,3	32,9	34,0	34,3	33,3	32,6	32,6	32,4	31,7
	3,5	34,9	50,6	47,8	44,5	36,0	37,2	43,0	55,4	47,3
E	0,8	2,2	2,1	2,0	1,8	1,5	1,8	2,2	1,9	2,1
	26,9	31,1	32,2	34,2	34,1	33,6	33,2	33,3	32,7	32,1
	5,3	35,5	39,2	46,4	41,4	32,8	37,7	46,5	37,6	38,7
D	1,2	2,1	2,2	2,1	2,1	2,0	2,1	2,4	3,2	2,7
	27,3	32,3	33,0	33,4	33,9	33,2	32,4	31,2	31,5	31,6
	9,0	39,6	45,0	44,9	47,3	41,9	40,1	39,3	54,6	46,7
C	2,3	3,1	2,9	2,5	2,3	2,5	2,8	3,1	2,1	1,6
	32,7	33,0	32,4	32,5	33,1	32,8	32,5	32,2	31,6	30,1
	45,5	63,5	55,4	48,3	47,6	50,0	54,1	57,8	36,3	22,2
B	1,9	2,3	2,6	2,3	2,2	2,0	2,2	2,2	1,9	1,7
	33,2	32,6	32,9	32,6	32,4	32,1	32,6	32,2	30,5	30,9
	39,8	45,0	52,6	45,0	42,0	36,9	43,0	41,0	28,1	26,4
A	1,6	2,0	2,4	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	1,8	1,4
	33,5	33,5	33,8	33,6	33,0	32,9	32,9	32,1	31,4	29,5
	34,6	43,2	53,5	45,9	43,0	40,5	40,5	36,9	30,3	17,0
[m/s]										
[°C]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[m]										

Příloha č. 1

Tabulky naměřených rychlostí, teplot a vypočtených dílčích výkonů v jednotlivých polích

Varianta 3:

2 řady trubek, 3. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 60/40°C, průtok 3,23 l/min

Rovina měření 64mm od lamel

J	0,9	2,7	3,3	3,2	3,3	2,8	3,4	3,4	2,6	1,9
	26,7	30,8	30,7	30,0	30,6	30,7	30,4	29,3	29,5	30,7
	3,3	35,6	42,8	36,4	42,0	36,3	41,8	33,3	26,6	24,6
I	1,0	2,6	3,5	3,5	2,8	3,4	3,3	3,4	2,8	2,0
	27,0	29,6	29,4	30,3	30,9	30,8	29,9	30,9	30,9	31,3
	4,4	27,2	35,0	42,2	37,6	44,9	36,8	45,6	37,6	28,7
H	0,9	2,8	3,6	3,1	3,0	2,9	3,5	3,8	3,0	2,7
	27,3	30,5	31,9	31,8	31,8	31,1	30,7	31,2	31,7	30,6
	4,4	35,0	56,5	48,0	46,4	40,2	45,4	53,6	45,7	34,4
G	0,8	2,4	2,7	2,8	2,6	2,4	2,6	2,3	2,3	3,0
	26,3	31,4	32,0	32,6	32,4	32,5	30,0	29,7	29,9	31,9
	2,4	34,9	43,0	48,4	43,8	40,9	29,6	24,6	25,6	47,1
F	0,9	2,6	3,7	2,8	2,2	2,0	2,1	3,0	3,9	3,8
	26,2	30,6	33,0	33,3	33,6	32,9	32,8	32,3	31,7	30,9
	2,5	33,1	67,3	52,9	43,0	35,9	37,3	49,8	59,4	51,0
E	0,9	2,5	2,7	2,3	2,2	1,7	1,9	3,0	2,3	2,7
	26,7	30,8	31,9	32,7	33,4	32,8	32,9	33,0	32,3	31,4
	3,3	33,0	42,4	40,3	42,0	30,2	34,1	54,6	38,2	39,3
D	1,2	2,7	3,8	3,4	3,0	2,4	2,5	3,3	3,8	3,6
	28,6	31,0	32,5	32,8	33,3	32,9	32,2	30,6	30,6	31,0
	9,8	36,9	64,8	60,3	56,6	43,1	40,9	42,0	48,4	49,1
C	3,0	3,8	3,6	3,4	3,5	3,4	3,7	3,8	2,7	1,5
	32,4	32,7	31,9	32,2	32,9	32,6	32,5	31,9	30,9	28,0
	50,5	66,6	56,5	55,7	62,9	58,8	63,1	59,6	36,2	10,2
B	2,7	3,0	3,6	3,1	2,8	3,2	3,5	3,1	2,2	2,1
	32,5	32,3	32,6	32,2	31,8	31,3	31,5	31,7	30,1	30,1
	46,1	49,8	62,2	50,8	43,3	45,9	51,7	47,2	25,5	24,4
A	1,6	2,5	3,0	2,5	2,6	2,3	2,4	2,2	2,4	1,4
	33,1	32,7	32,9	32,3	32,6	32,8	33,0	31,5	30,0	30,7
	29,5	43,8	53,9	41,5	44,9	40,8	43,7	32,5	27,3	18,2
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 92mm od lamel

J	0,8	2,6	3,1	3,1	3,2	2,7	3,5	3,2	2,4	2,0
	26,0	30,4	30,6	29,8	30,6	31,3	30,5	30,2	30,2	30,6
	1,8	31,9	39,5	33,8	40,8	38,7	43,8	37,9	28,4	25,5
I	0,9	2,5	3,3	3,6	2,8	3,2	3,2	3,2	2,7	2,2
	26,3	30,1	30,1	30,5	31,2	30,8	30,0	30,7	30,5	31,1
	2,7	29,0	38,3	45,0	39,5	42,2	36,4	41,5	33,8	30,5
H	0,8	2,6	3,4	3,0	2,9	3,0	3,4	3,6	2,9	2,8
	26,9	30,2	31,8	31,9	31,8	31,0	30,9	31,1	31,4	30,8
	3,5	30,8	52,6	47,1	44,9	40,9	45,6	50,0	42,2	36,9
G	0,7	2,4	2,9	2,9	2,7	2,6	2,8	2,4	2,5	2,8
	26,0	31,1	31,5	32,7	32,1	32,6	30,3	30,0	30,0	31,7
	1,6	33,3	42,9	50,8	43,6	44,9	33,8	27,3	28,4	42,7
F	0,9	2,5	3,5	2,7	2,3	2,1	2,2	2,9	3,7	3,5
	25,9	30,4	32,8	33,1	33,5	32,5	32,2	32,4	31,7	31,2
	1,9	30,7	62,1	49,7	44,5	35,8	36,0	48,8	56,4	49,4
E	0,8	2,4	2,8	2,5	2,1	1,8	2,0	3,0	2,5	2,8
	26,3	30,7	32,1	33,0	33,5	32,2	32,7	32,8	32,0	31,5
	2,4	31,1	45,2	45,5	40,6	29,5	35,0	53,2	39,8	41,4
D	1,0	2,5	3,5	3,3	2,8	2,5	2,6	3,1	3,6	3,3
	28,2	30,8	32,1	32,9	33,4	32,9	32,1	30,9	30,5	31,1
	7,3	33,0	56,5	59,3	53,5	44,9	42,0	41,6	45,0	45,8
C	2,9	3,6	3,4	3,2	3,2	3,2	3,6	3,5	2,5	1,3
	31,9	32,7	32,3	32,4	32,6	32,5	32,2	32,0	30,7	27,2
	45,5	63,1	56,5	53,9	55,3	54,6	59,0	55,7	32,4	6,5
B	2,8	2,9	3,4	3,0	2,8	3,0	3,4	2,9	2,1	2,0
	32,2	32,3	32,7	32,5	32,0	31,7	31,8	31,8	30,1	30,0
	45,9	48,2	59,6	51,2	44,6	45,7	52,6	44,9	24,4	22,7
A	1,7	2,6	2,9	2,6	2,5	2,4	2,5	2,2	2,3	1,5
	32,3	32,2	32,5	32,2	32,5	32,7	32,8	31,4	29,8	30,2
	28,2	42,6	49,5	42,6	42,7	42,0	44,4	32,0	25,1	17,7
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Varianta 4:

3 řady trubek, 1. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/45°C, průtok 3,73 l/min

Rovina měření 50mm od lamel

J	0,5	1,3	1,9	0,8	0,9	1,1	1,0	0,8	0,9	0,7
	42,0	42,2	41,0	42,2	41,8	42,1	42,3	42,1	41,9	42,0
	19,3	50,9	69,2	32,9	34,4	42,8	38,6	31,1	34,6	27,1
I	0,6	0,8	0,7	1,0	1,0	0,8	0,8	2,0	1,5	0,5
	42,2	42,8	42,7	42,6	42,5	42,4	42,4	41,1	42,3	42,8
	24,6	33,6	29,0	39,2	40,2	30,5	33,2	72,9	59,0	20,2
H	1,6	1,4	1,7	2,0	2,6	2,3	2,5	2,1	2,1	1,3
	41,6	41,9	41,7	41,7	41,6	41,8	40,8	41,6	41,3	42,2
	61,9	53,1	66,1	76,4	96,3	86,4	88,1	80,1	78,6	50,1
G	1,9	2,7	1,7	1,0	1,2	1,3	1,0	1,4	1,9	1,0
	41,7	41,1	41,2	42,9	42,2	42,7	43,2	43,8	42,6	42,7
	70,3	99,2	63,4	40,3	48,5	53,1	43,1	58,2	75,7	39,9
F	1,7	2,7	1,9	1,5	0,9	1,0	1,6	2,8	2,3	2,1
	41,8	40,8	43,8	43,9	44,1	43,7	43,8	42,0	41,4	41,2
	65,3	95,2	83,0	64,9	38,2	42,5	68,4	106,7	86,9	76,3
E	0,9	1,4	1,0	0,9	0,7	1,1	0,9	1,5	0,7	0,8
	43,2	43,6	43,5	44,6	44,9	43,8	43,6	43,3	43,0	42,2
	37,7	57,1	40,8	37,9	31,7	45,3	36,8	63,3	28,3	29,7
D	1,2	1,9	1,8	2,3	1,3	1,7	2,0	3,0	2,4	2,0
	42,1	41,9	42,7	43,8	44,3	44,0	42,4	41,2	41,1	41,2
	47,1	71,9	71,3	99,2	54,9	73,9	77,6	110,9	86,8	71,9
C	1,0	1,7	2,0	1,9	1,8	1,6	1,9	1,7	1,8	1,6
	43,1	42,7	42,8	43,0	43,3	42,5	42,5	42,2	41,9	41,8
	39,9	67,6	81,8	78,6	72,8	64,1	75,6	66,5	69,2	61,1
B	1,3	1,6	2,4	1,8	1,0	1,1	1,7	1,3	1,5	1,0
	43,4	42,3	41,9	42,8	42,9	42,7	42,5	42,0	42,9	42,5
	55,2	62,2	91,9	73,3	40,3	43,9	67,7	51,4	60,7	40,6
A	0,7	1,0	1,8	1,4	1,6	1,8	1,6	1,6	1,2	1,0
	44,0	43,6	44,4	44,0	43,6	43,8	43,7	42,8	43,1	43,7
	29,4	40,6	81,2	60,1	66,8	74,8	66,4	64,8	48,6	42,1
[m/s]										
[°C]										
[W]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 78mm od lamel

J	0,9	1,6	1,8	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,0	1,0
	42,5	42,3	41,4	42,1	42,2	42,0	42,6	42,2	42,5	42,1
	35,8	63,0	67,1	38,9	43,0	46,4	40,0	43,0	39,8	38,9
I	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,9	1,6	0,8
	42,3	42,7	42,6	42,5	42,4	42,3	42,3	41,6	42,2	42,6
	35,4	36,2	40,0	43,8	43,5	43,3	43,3	71,7	62,6	32,0
H	1,6	1,4	1,7	1,8	2,3	2,1	2,3	2,0	2,0	1,4
	41,8	42,1	42,0	41,8	41,9	42,1	41,5	41,9	41,8	42,3
	62,7	53,7	65,7	68,8	88,4	81,7	86,3	76,9	76,4	55,1
G	1,8	2,5	1,6	1,1	1,3	1,4	1,1	1,4	1,8	1,1
	42,0	41,7	41,5	42,8	42,8	43,0	42,7	43,4	42,5	42,6
	69,6	95,0	60,1	44,5	52,6	57,3	44,3	56,9	71,7	44,0
F	1,7	2,5	1,8	1,6	1,0	1,1	1,7	2,5	2,1	2,0
	42,1	41,5	43,7	44,0	44,0	44,0	43,8	42,1	41,9	41,6
	66,5	93,8	76,6	69,2	43,2	47,5	72,7	97,2	80,7	75,5
E	1,1	1,4	1,1	1,0	0,8	1,0	1,0	1,6	1,0	0,9
	42,7	43,1	43,0	44,5	44,8	43,8	43,9	43,1	42,8	42,3
	44,3	55,6	45,0	44,4	36,0	42,8	43,0	65,9	40,5	35,4
D	1,3	1,8	1,7	2,4	1,4	1,6	2,1	2,7	2,2	1,9
	42,3	42,2	42,6	44,0	44,4	43,5	42,4	41,6	41,6	41,7
	51,2	70,4	68,1	103,7	61,8	67,3	83,1	102,0	83,1	72,2
C	1,2	1,7	1,8	1,8	1,7	1,5	1,7	1,6	1,7	1,5
	42,8	42,6	42,7	42,7	43,2	42,4	42,4	42,3	42,1	42,1
	48,6	67,3	72,5	72,5	70,4	59,4	67,3	64,1	65,3	58,3
B	1,4	1,5	2,2	1,7	1,3	1,2	1,6	1,4	1,6	1,0
	43,1	42,4	42,1	42,6	42,7	42,6	42,5	42,2	42,8	42,4
	57,6	59,4	85,6	68,1	52,3	48,0	63,7	54,8	64,8	39,6
A	1,0	1,1	1,7	1,5	1,6	1,7	1,6	1,5	1,3	1,0
	43,4	43,1	43,7	43,4	43,1	43,2	43,1	42,6	42,8	43,1
	41,9	45,3	72,3	62,8	65,1	70,4	64,2	60,1	52,6	41,2
[m/s]										
[°C]										
nm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Příloha č. 1

Tabulky naměřených rychlostí, teplot a vypočtených dílčích výkonů v jednotlivých polích

Varianta 5:

3 řady trubek, 2. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/45°C, průtok 4,48 l/min

Rovina měření 50mm od lamel

J	1,3	2,8	3,8	1,4	1,3	1,2	2,4	1,3	1,7	1,3
	38,7	38,6	37,4	38,0	38,2	38,5	38,4	38,6	39,0	38,4
	40,5	86,6	107,2	41,4	39,0	37,8	73,2	40,2	54,1	39,6
I	1,4	1,8	1,2	2,5	1,2	1,4	1,5	3,9	2,9	1,4
	38,5	39,2	38,8	38,5	38,6	38,1	38,5	37,5	38,5	38,6
	43,3	59,1	38,0	75,5	38,1	41,4	45,4	109,5	89,4	42,1
H	2,3	2,1	1,5	3,5	3,5	3,8	3,6	3,9	2,1	2,9
	37,7	39,1	37,9	37,8	37,9	37,9	37,2	37,8	37,5	38,2
	66,4	68,0	44,6	101,6	103,9	111,5	99,1	114,4	59,4	85,9
G	2,2	2,6	2,2	1,7	2,2	2,8	2,1	1,5	2,7	1,5
	37,9	38,3	37,5	39,2	38,5	38,5	39,3	41,1	38,8	38,8
	64,6	78,7	62,6	55,9	66,0	85,7	67,3	53,5	83,5	47,4
F	2,9	3,9	3,5	2,6	1,8	2,0	2,9	4,0	3,7	2,7
	38,0	37,1	39,9	40,1	40,3	40,0	39,1	38,1	37,6	37,4
	85,8	107,3	119,6	89,3	63,0	67,9	93,3	118,9	107,2	75,3
E	1,0	2,2	1,5	1,4	1,5	1,8	1,8	2,2	1,3	0,9
	39,5	39,8	38,7	40,2	40,8	40,1	40,2	39,4	39,5	38,4
	34,3	74,1	47,1	46,7	53,9	60,8	63,3	70,4	44,2	25,9
D	2,1	3,3	3,1	2,9	1,8	2,0	3,3	3,9	3,8	2,7
	38,3	38,0	38,9	40,7	40,1	40,2	38,6	37,7	37,3	37,5
	63,5	97,6	99,3	101,8	60,1	68,5	101,5	113,2	106,3	77,1
C	1,4	2,7	3,6	3,4	2,8	2,6	3,0	2,7	2,5	2,8
	39,3	38,8	39,0	39,2	39,7	39,6	38,6	38,3	38,0	37,7
	45,9	84,4	113,1	108,9	95,0	85,4	92,5	82,3	73,9	80,9
B	2,4	3,8	3,9	3,1	2,8	2,7	3,1	2,8	2,8	1,2
	38,3	38,5	38,2	39,1	39,0	38,8	38,4	38,1	39,1	38,7
	71,4	116,7	117,1	98,8	88,9	84,8	95,1	83,4	89,8	38,3
A	1,4	1,5	2,6	1,9	2,5	2,1	2,4	1,9	1,7	1,4
	40,2	39,8	39,5	40,4	39,8	40,0	39,9	40,1	39,3	39,2
	47,4	50,8	85,1	66,9	82,5	72,0	82,4	64,9	55,9	45,2
[m/s]										
[°C]										
[W]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 78mm od lamel

J	1,5	2,5	3,2	1,6	1,5	1,4	2,2	1,3	1,8	1,5
	38,5	38,3	37,8	38,5	38,2	38,5	38,6	38,6	38,8	38,3
	46,1	75,6	93,2	49,1	45,0	43,0	68,1	40,2	56,5	45,4
I	1,6	1,9	1,4	2,3	1,5	1,6	1,6	3,3	2,6	1,6
	38,6	39,1	38,9	38,7	38,7	38,4	38,7	38,0	38,5	38,6
	49,5	60,9	44,3	71,7	46,7	48,8	49,9	97,6	79,8	49,5
H	2,2	2,2	1,6	3,1	3,1	3,4	3,1	3,6	2,1	2,7
	37,9	39,0	38,1	38,1	38,1	38,1	37,8	38,1	38,0	38,4
	64,6	70,1	47,7	92,4	92,4	101,3	90,3	107,3	62,1	82,3
G	2,2	2,5	2,2	1,8	2,2	2,5	2,1	1,6	2,5	1,6
	38,0	38,6	38,5	39,8	39,0	39,8	39,3	39,9	38,8	38,7
	65,1	77,3	67,6	60,6	70,1	84,2	68,3	54,2	78,5	49,9
F	2,7	3,4	3,0	2,5	1,8	1,9	3,0	3,4	3,3	2,4
	38,3	37,8	39,8	40,0	40,1	39,8	39,1	38,4	38,0	37,8
	81,7	99,0	101,0	85,3	62,2	64,0	96,2	103,6	97,6	69,9
E	1,3	2,2	2,0	1,6	1,6	1,9	2,0	2,2	1,5	1,6
	39,3	39,6	38,6	40,3	40,5	40,1	40,1	39,3	39,3	38,6
	42,3	73,1	61,9	55,7	56,4	65,3	68,7	71,6	48,8	49,5
D	2,1	3,1	2,8	3,0	1,9	1,9	3,2	3,3	3,4	2,6
	38,4	38,4	39,0	40,5	40,2	40,1	38,8	38,0	37,8	37,8
	64,0	94,5	89,2	105,8	65,7	65,3	100,5	97,6	99,0	75,7
C	1,6	2,5	3,0	3,1	2,5	2,5	2,7	2,6	2,3	2,6
	39,1	38,8	39,0	39,2	39,5	39,3	38,7	38,4	38,3	38,1
	51,3	78,5	95,5	100,1	82,5	81,3	84,1	79,3	69,6	77,5
B	2,4	3,4	3,6	2,8	2,6	2,5	2,8	2,6	2,6	1,5
	38,3	38,7	39,3	39,0	39,0	39,0	38,6	38,4	39,0	38,6
	72,6	106,0	117,1	89,2	82,8	79,6	86,6	79,3	82,8	46,4
A	1,6	1,6	2,4	1,9	2,4	2,1	2,2	1,9	1,9	1,6
	39,9	39,6	39,3	40,0	39,6	39,8	39,8	39,9	39,2	39,1
	54,2	53,1	78,1	64,8	79,7	70,7	74,1	64,4	61,4	51,3
[m/s]										
[°C]										
[W]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Varianta 6:

3 řady trubek, 3. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/40°C, průtok 3,05 l/min

Rovina měření 50mm od lamel

J	1,9	2,2	3,6	2,2	2,7	2,1	3,2	2,1	2,0	1,8
	34,1	34,0	33,3	33,6	33,6	34,2	33,8	34,1	34,4	34,0
	39,3	45,0	68,0	43,0	52,8	43,9	64,1	43,5	42,8	36,9
I	1,9	2,1	2,2	3,3	2,2	2,8	2,3	3,8	2,3	2,0
	34,3	34,6	34,3	34,0	34,3	34,0	34,0	33,6	34,3	34,3
	40,2	45,9	46,5	67,6	46,5	57,3	47,1	74,3	48,7	42,3
H	2,2	2,3	3,7	4,2	5,0	5,0	5,5	4,7	3,4	2,4
	33,4	34,9	33,7	33,7	33,5	33,8	33,1	33,7	33,5	34,0
	42,0	51,8	73,2	83,1	96,7	100,1	100,4	93,0	65,7	49,1
G	3,5	5,7	4,2	2,5	2,7	3,0	2,6	2,0	3,7	2,2
	33,7	33,9	34,5	34,2	34,0	34,8	34,9	36,3	34,3	34,2
	69,3	114,8	90,8	52,3	55,3	66,9	58,6	51,4	78,3	46,0
F	4,4	5,4	4,5	3,3	2,0	2,1	4,2	5,3	4,4	3,7
	34,0	33,1	35,2	35,4	36,0	35,2	34,1	33,8	33,6	33,4
	90,1	98,9	104,4	78,1	50,0	48,7	86,9	106,3	86,3	70,7
E	1,6	3,8	2,2	2,3	1,8	2,1	2,2	3,6	1,7	1,4
	35,2	35,2	35,0	36,3	36,4	36,1	35,2	34,9	35,2	34,1
	37,1	88,2	50,0	59,1	46,7	53,0	51,0	81,1	39,4	29,0
D	2,7	2,1	3,5	4,4	3,0	3,3	3,5	5,7	5,3	3,8
	34,0	34,0	34,2	36,2	36,2	35,2	33,8	33,6	33,4	34,4
	55,3	43,0	73,2	111,1	76,4	76,6	70,1	110,7	101,3	81,3
C	1,9	3,4	3,7	4,1	4,1	3,3	3,9	4,3	4,0	3,8
	34,9	34,4	34,6	34,9	35,2	35,0	34,3	33,9	33,7	33,4
	42,8	72,7	80,8	92,3	95,1	75,1	82,5	87,1	79,2	72,6
B	2,8	3,6	5,5	3,0	2,0	1,9	2,5	2,7	4,1	1,6
	34,0	34,2	34,0	34,6	34,9	34,3	34,0	34,0	34,6	34,3
	57,3	75,3	113,0	65,5	45,0	40,2	51,2	55,3	89,5	33,8
A	1,6	1,8	2,3	2,7	2,8	2,9	2,8	2,2	1,8	1,5
	35,6	35,2	34,9	35,9	35,9	35,2	35,2	35,3	34,9	34,6
	38,6	41,8	51,8	66,9	65,0	67,3	65,0	51,5	40,5	32,8
[m/s]										
[°C]										
[W]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Rovina měření 78mm od lamel

J	2,0	2,3	3,6	2,3	2,8	2,2	3,1	2,2	2,1	1,9
	34,3	34,5	34,0	34,4	34,3	34,0	33,9	34,3	34,3	34,2
	42,3	49,7	73,7	49,2	59,2	45,0	62,8	46,5	44,4	39,8
I	2,0	2,2	2,3	3,3	2,3	2,9	2,4	3,7	2,4	2,1
	34,5	34,5	34,6	34,1	34,5	34,2	34,5	34,2	34,7	34,5
	43,2	47,5	50,2	68,3	49,7	60,7	51,9	77,4	53,0	45,4
H	2,3	2,4	3,6	4,1	4,8	4,8	5,0	4,6	3,3	2,4
	33,6	34,6	34,2	33,9	33,8	34,1	33,8	34,2	33,9	34,2
	45,0	52,4	75,3	83,0	96,1	99,4	100,1	96,3	66,8	50,2
G	3,4	4,8	4,1	2,6	2,8	3,0	2,7	2,1	3,8	2,3
	34,0	34,2	33,6	34,5	34,2	34,0	35,0	35,6	34,5	34,3
	69,6	100,5	80,2	56,2	58,6	61,4	61,4	50,6	82,1	48,7
F	4,3	4,8	4,3	3,2	2,1	2,2	4,1	5,1	4,3	3,6
	34,6	34,3	35,1	35,4	35,8	35,2	36,0	34,1	34,0	33,9
	93,9	101,5	98,8	75,7	51,6	51,0	102,6	105,6	88,0	72,9
E	1,7	3,7	2,3	2,3	1,9	2,0	2,3	3,7	2,2	2,1
	34,2	34,4	35,1	36,2	36,3	36,0	35,3	35,0	34,8	34,5
	35,6	79,1	52,8	58,6	48,8	50,0	53,9	84,2	49,0	45,4
D	2,7	2,2	3,4	4,3	3,1	3,2	3,4	4,9	4,8	3,7
	34,4	34,4	35,2	36,0	36,1	35,3	33,8	33,8	34,1	34,7
	57,7	47,0	78,9	107,6	78,3	75,0	68,1	98,1	99,4	81,6
C	2,0	3,3	3,8	4,0	4,0	3,2	3,8	4,1	3,9	3,7
	34,8	34,6	34,7	34,8	35,2	34,9	34,4	34,1	33,8	33,7
	44,6	72,1	83,8	89,2	92,8	72,1	81,3	84,9	78,1	73,2
B	2,8	3,5	4,9	3,1	2,1	2,0	2,6	2,7	3,9	1,7
	34,1	34,3	34,6	34,7	34,8	34,5	34,2	34,3	34,5	34,3
	58,0	74,0	107,0	68,4	46,8	43,2	54,4	57,1	84,3	36,0
A	1,7	1,9	2,4	2,8	2,9	2,8	2,8	2,3	1,9	1,6
	35,3	35,1	35,1	35,7	35,1	35,0	35,1	35,2	35,0	34,5
	39,8	43,7	55,1	68,2	66,6	63,7	64,3	53,4	43,2	34,6
[m/s]										
[°C]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[W]										

Příloha č. 1

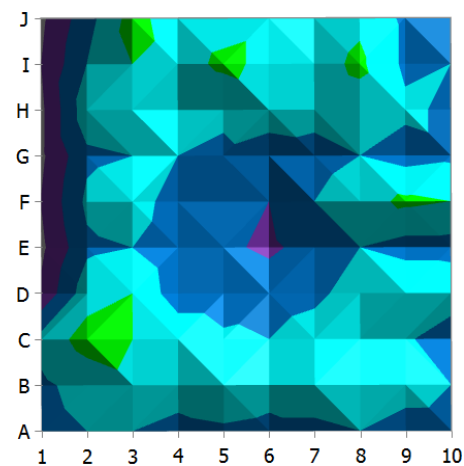
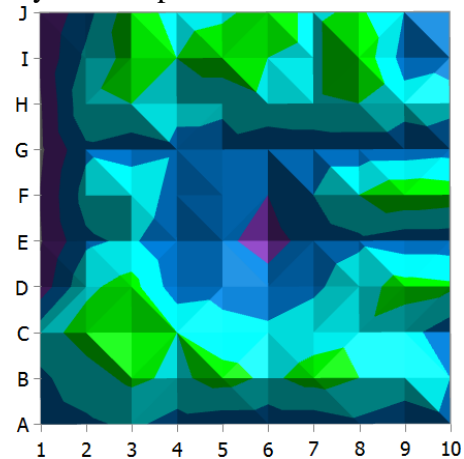
Varianța 1:

2 řady trubek, 1. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 60/50°C, průtok 7,41 l/min

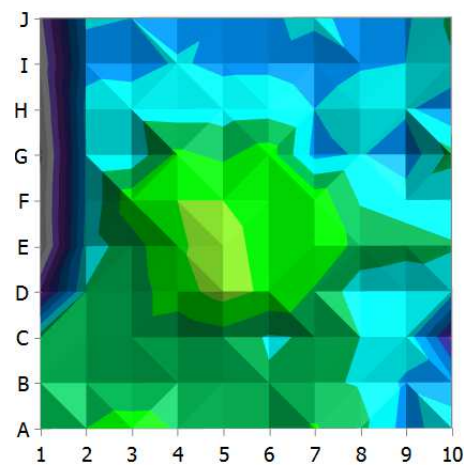
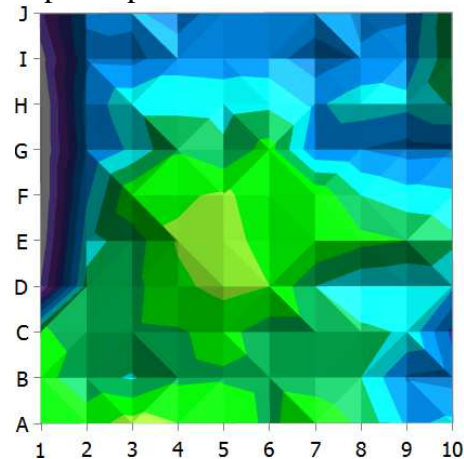
Rovina měření 64mm od lamel

Rovina měření 92mm od lamel

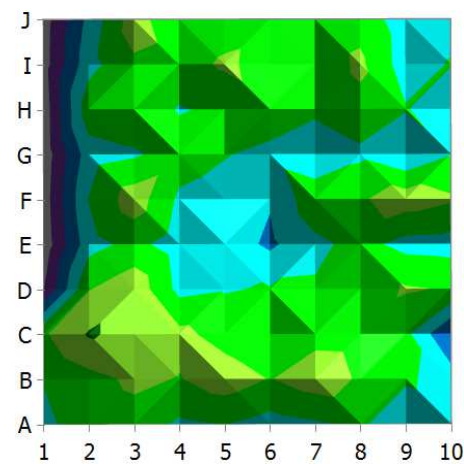
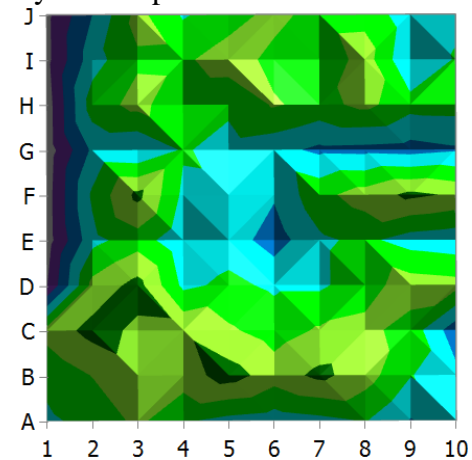
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 1

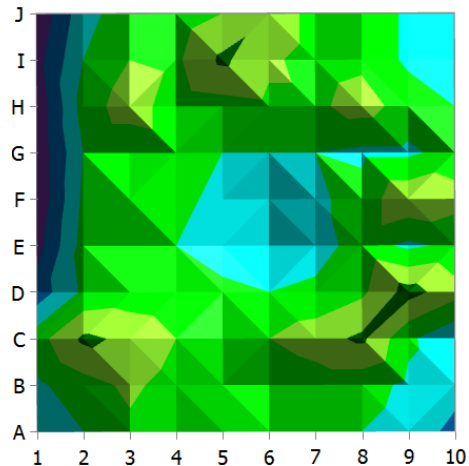
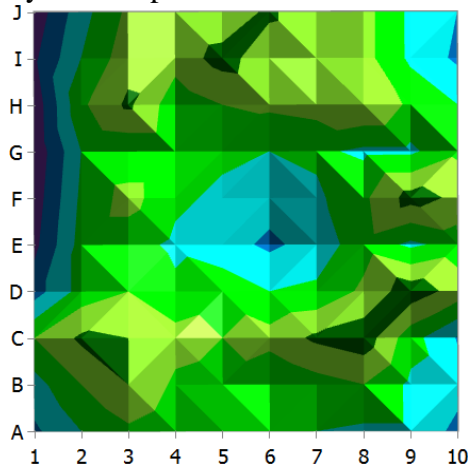
Varianta 2:

2 řady trubek, 2. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 55/45°C, průtok 7,69 l/min

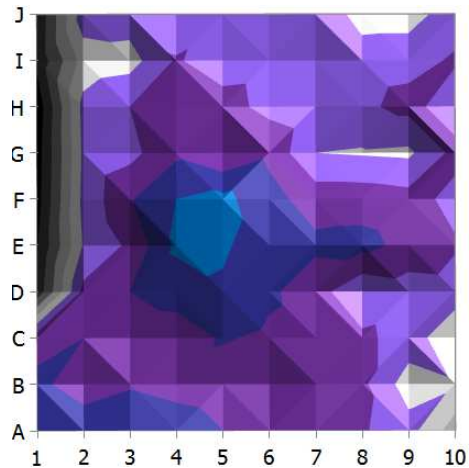
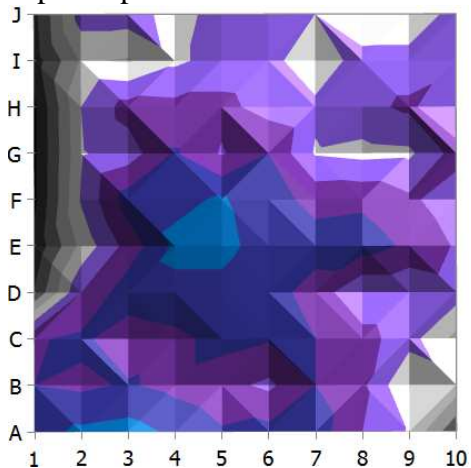
Rovina měření 64mm od lamel

Rovina měření 92mm od lamel

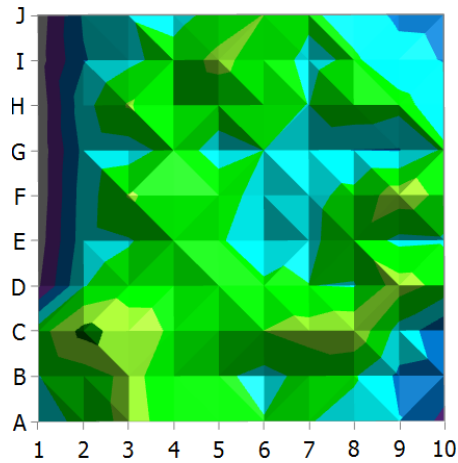
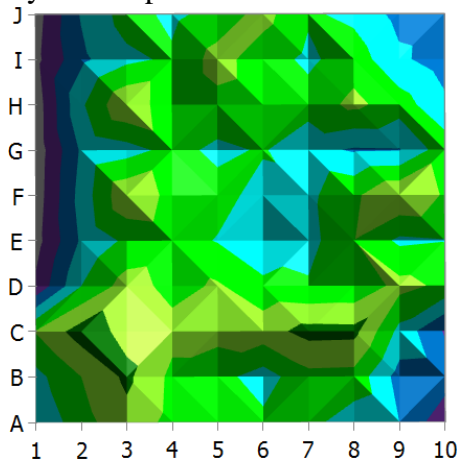
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 1

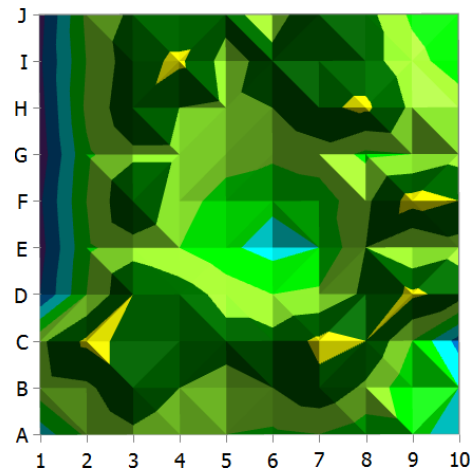
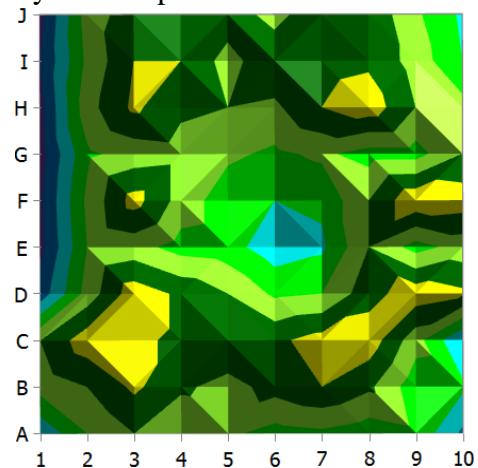
Varianța 3:

2 řady trubek, 3. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 60/40°C, průtok 3,23 l/min

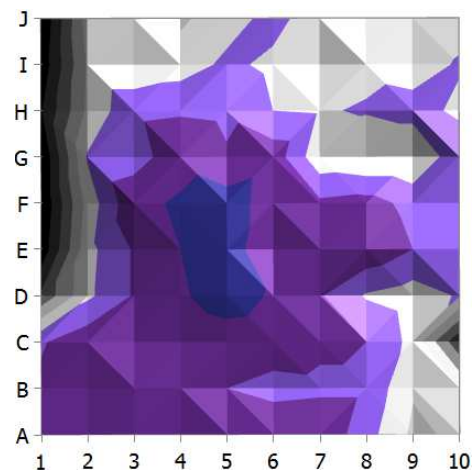
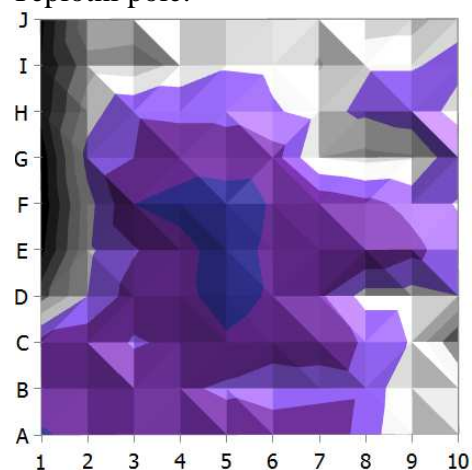
Rovina měření 64mm od lamel

Rovina měření 92mm od lamel

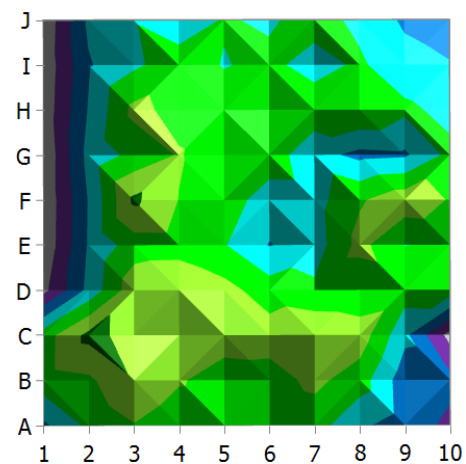
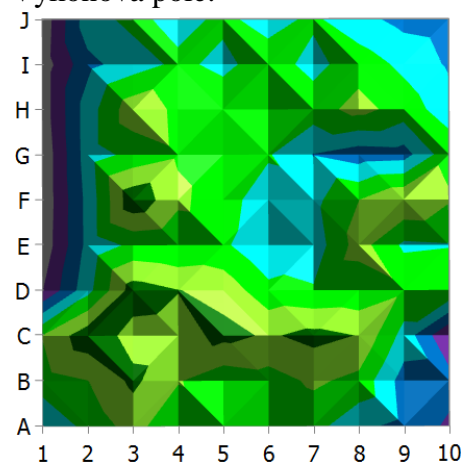
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 1

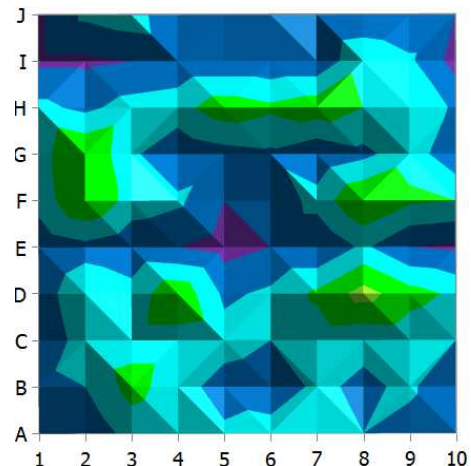
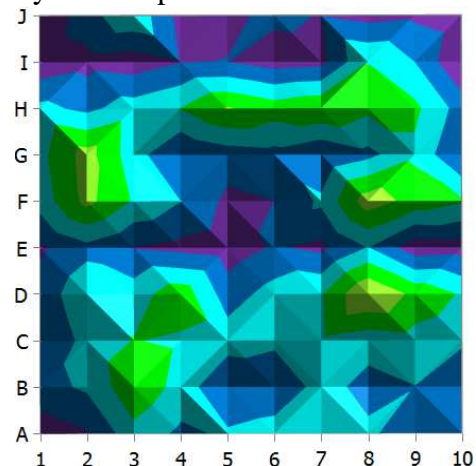
Varianța 4:

3 řady trubek, 1. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/45°C, průtok 3,73 l/min

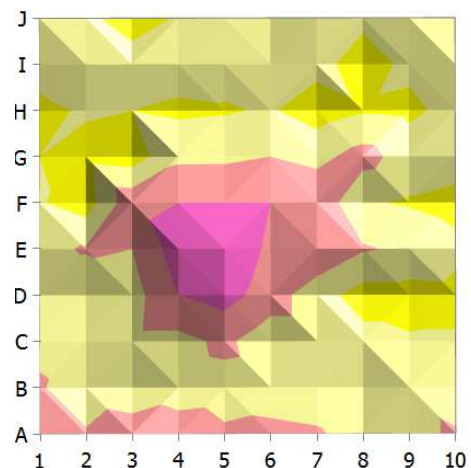
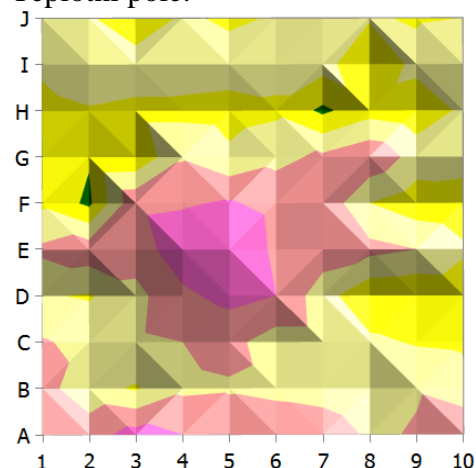
Rovina měření 50mm od lamel

Rovina měření 78mm od lamel

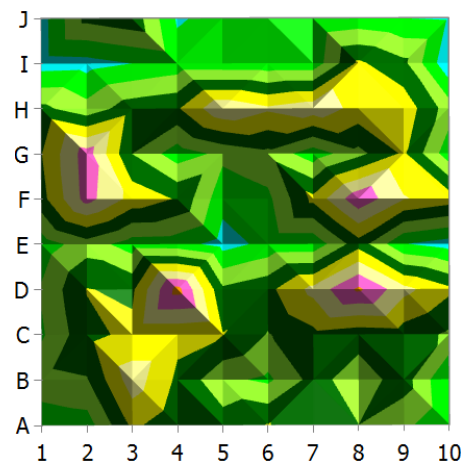
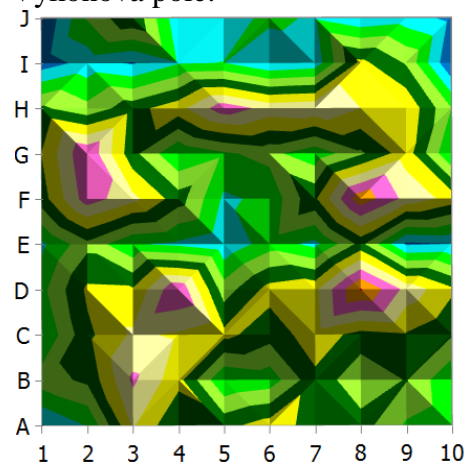
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 1

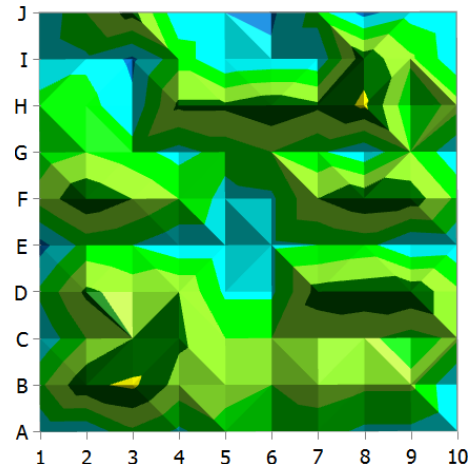
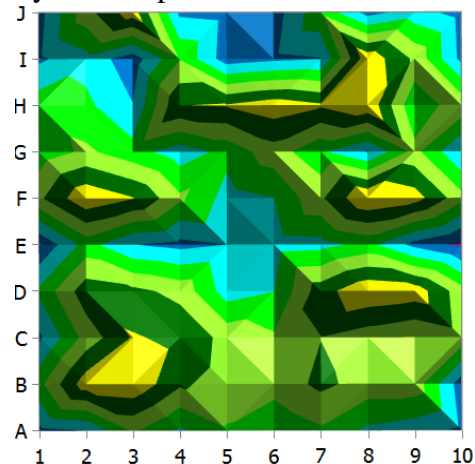
Varianța 5:

3 řady trubek, 2. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/45°C, průtok 4,48 l/min

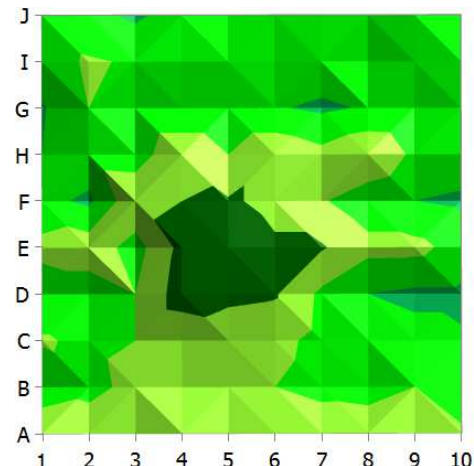
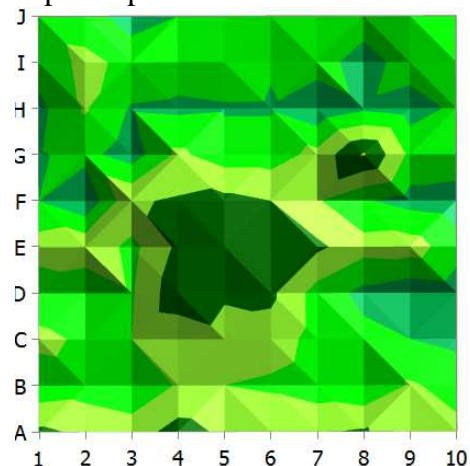
Rovina měření 50mm od lamel

Rovina měření 78mm od lamel

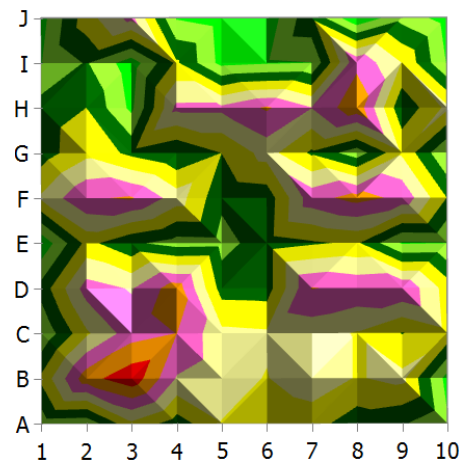
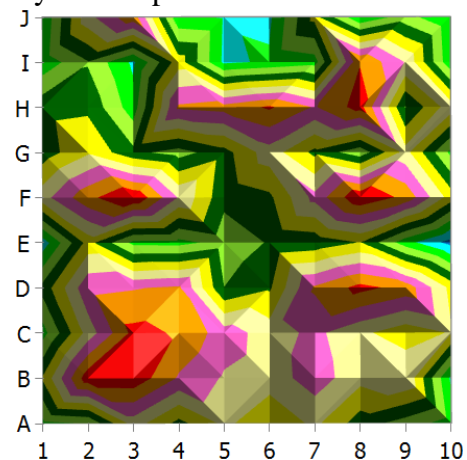
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 1

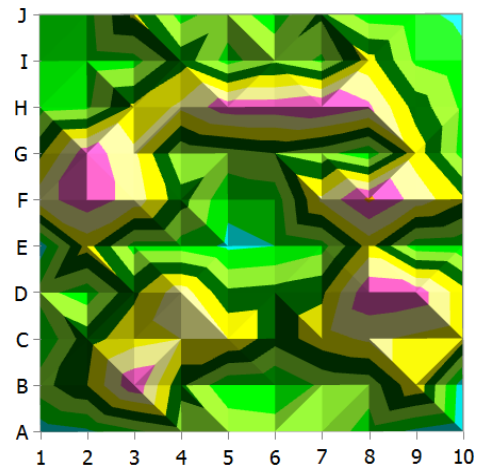
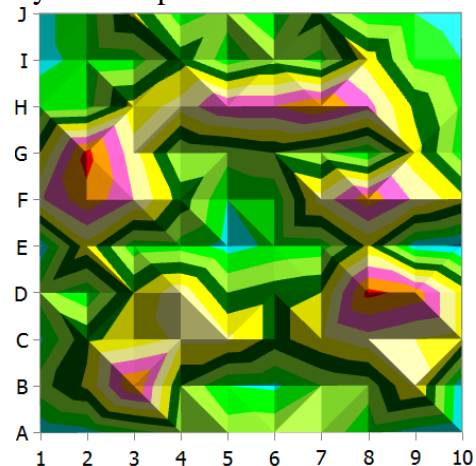
Varianța 6:

3 řady trubek, 3. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 70/40°C, průtok 3,05 l/min

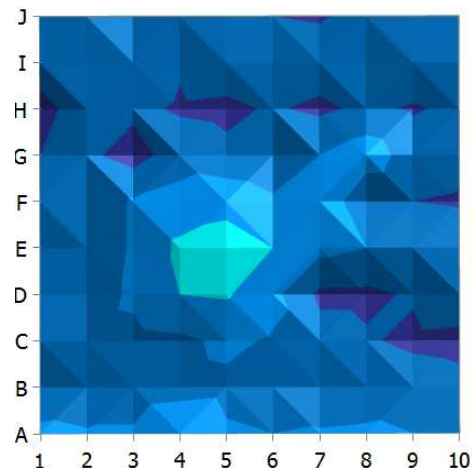
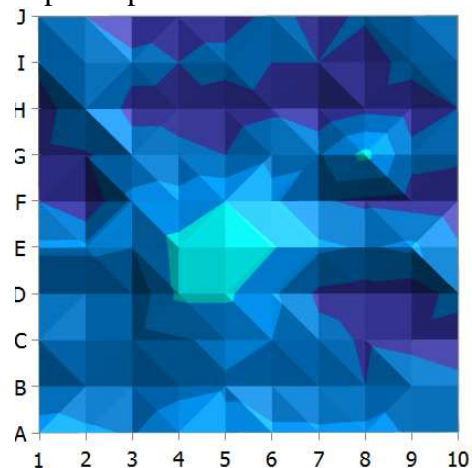
Rovina měření 50mm od lamel

Rovina měření 78mm od lamel

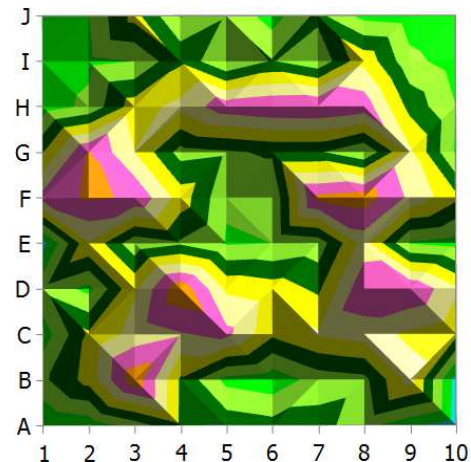
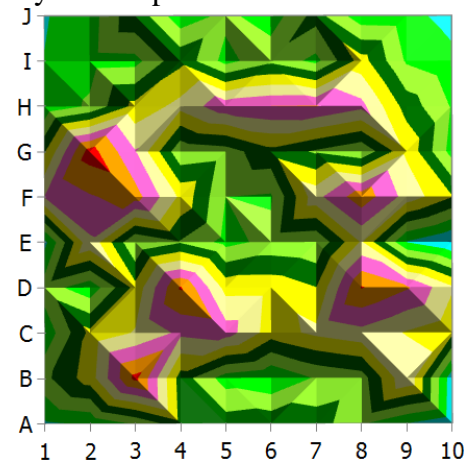
Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Výkonová pole:



Srovnávací stupnice rychlostí, teplot a tepelných výkonů:

[illegible]

Příloha č. 2

Porovnání výměníků: 2 řady trubek, 1. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 60/50°C

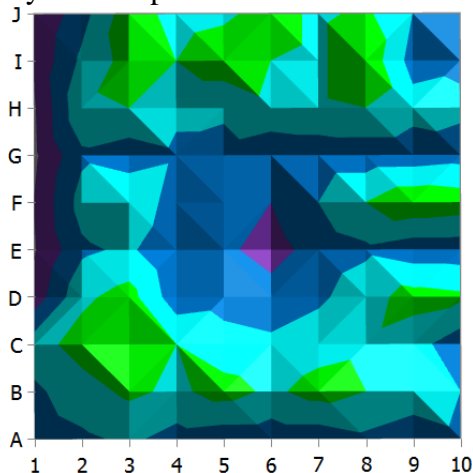
Výrobce JANKA, průtok 7,41 l/min

J	0.5 31.7	1.3 35.1	2.3 35.2	1.8 34.5	1.9 35.5	2.2 35.6	1.9 35.7	2.1 34.8	1.5 34.9	1.3 37.9
I	0.6 30.5	1.6 34.8	2.2 34.7	2.0 35.6	2.3 35.3	2.0 35.4	1.9 34.4	2.4 35.1	1.3 35.3	1.4 37.8
H	0.5 29.8	1.9 35.4	2.0 36.7	1.6 36.7	1.6 36.6	1.9 35.8	1.9 35.6	2.0 36.3	1.7 36.3	1.6 37.1
G	0.4 29.8	1.4 35.0	1.2 36.2	1.4 37.9	1.3 37.2	1.1 38.4	1.2 35.2	1.2 35.0	1.2 34.6	1.3 34.7
F	0.5 29.8	1.7 35.8	2.0 38.8	1.2 38.9	1.2 39.1	1.0 38.7	1.5 38.5	2.0 37.0	2.4 36.4	2.3 36.2
E	0.5 30.2	1.4 36.6	1.6 37.5	1.0 39.1	1.1 39.2	0.8 38.8	1.2 39.0	1.4 38.3	1.2 38.0	1.2 37.2
D	0.7 31.1	1.9 37.3	2.2 37.7	1.2 38.8	1.3 39.3	1.2 39.0	1.4 37.0	1.8 36.2	2.2 36.0	2.1 36.2
C	1.8 38.1	2.2 37.7	2.0 37.8	2.0 37.9	1.7 38.3	1.6 37.5	1.8 37.5	1.9 37.2	1.7 36.9	1.2 33.7
B	1.4 38.4	1.8 37.3	2.1 36.9	1.9 37.8	2.2 37.9	1.9 37.7	2.2 37.5	2.0 37.0	1.8 34.9	1.5 34.6
A	1.2 39.0	1.4 38.6	1.6 39.4	1.3 39.0	1.2 38.6	1.2 37.8	1.2 38.7	1.4 37.8	1.2 35.8	1.4 36.2
m/s °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

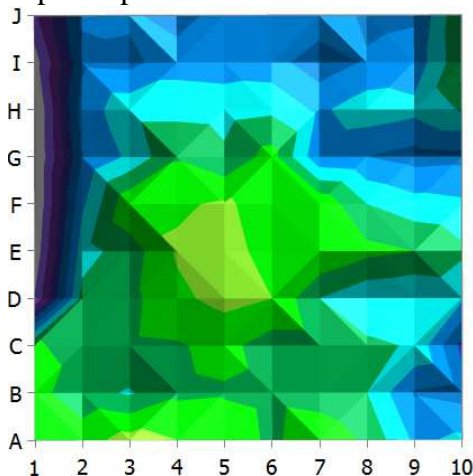
Výrobce GEA, průtok 8,02 l/min

D	1,3	1,6	2,1	1,2
	35,5	35,3	34,7	34,4
C	1,8	0,9	1,2	1,7
	35,9	37,7	36,5	34,8
B	1,8	1,0	0,9	1,6
	37,4	38,4	37,3	35,6
A	1,6	2,4	1,9	1,2
	37,1	37,0	36,9	36,5
m/s	1	2	3	4
°C				

Rychlostní pole:



Teplotní pole:



Srovnávací stupnice rychlostí a teplot:

[illegible]

Příloha č. 2

Porovnání výměníků: 2 řady trubek, 2. otáčky ventilátoru, teplotní spád vody 55/45°C

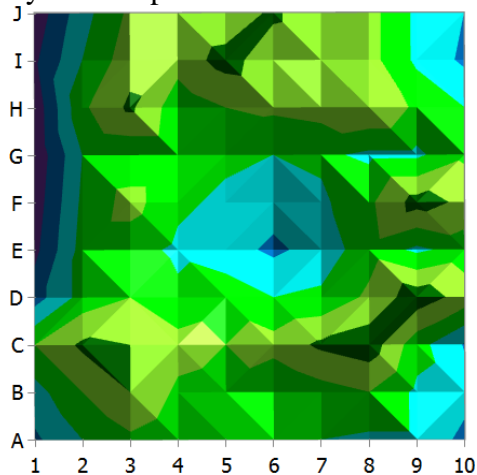
Výrobce JANKA, průtok 7,69 l/min

J	0,7 27,7	1,8 31,5	2,6 31,5	2,5 30,6	2,6 31,4	3,1 31,6	2,6 31,0	2,7 30,1	1,9 30,2	1,5 31,4
I	0,9 27,5	2,0 30,1	2,8 29,9	2,7 30,8	3,2 31,2	2,7 31,3	2,6 30,4	2,7 31,4	1,9 31,4	1,4 31,8
H	0,7 26,8	2,4 31,0	3,1 32,4	2,2 32,3	2,5 32,3	2,6 31,6	2,7 31,2	3,0 31,7	2,4 32,2	2,0 31,1
G	0,6 26,8	2,0 30,9	2,1 31,5	2,1 33,1	2,1 31,9	2,0 33,0	2,1 30,9	1,9 30,7	1,9 30,8	2,4 32,4
F	0,7 26,8	2,1 31,1	2,7 33,5	2,1 33,8	1,9 34,1	1,7 33,4	1,9 32,7	2,4 32,8	3,2 32,2	2,9 31,4
E	0,9 27,2	2,2 30,3	2,2 32,4	1,9 34,2	1,9 34,2	1,7 33,7	1,7 33,4	2,3 33,5	1,9 32,8	2,2 31,9
D	1,3 28,1	2,2 32,0	2,5 33,6	2,1 33,8	2,3 33,8	2,0 33,4	2,1 32,6	3,1 31,1	2,6 31,1	3,3 31,5
C	2,5 32,9	3,1 33,2	3,0 32,4	2,7 32,7	2,5 34,3	2,7 33,1	3,1 33,0	3,2 32,4	2,2 31,4	1,5 29,7
B	1,8 33,0	2,5 32,8	3,0 33,1	2,4 32,7	2,3 32,3	2,0 31,8	2,3 33,0	2,5 32,2	1,9 30,0	1,7 30,6
A	1,4 33,6	2,0 34,2	2,4 34,4	2,1 33,8	2,1 33,1	2,0 33,3	2,0 33,5	1,9 32,0	1,9 30,9	1,4 28,2
m/s °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

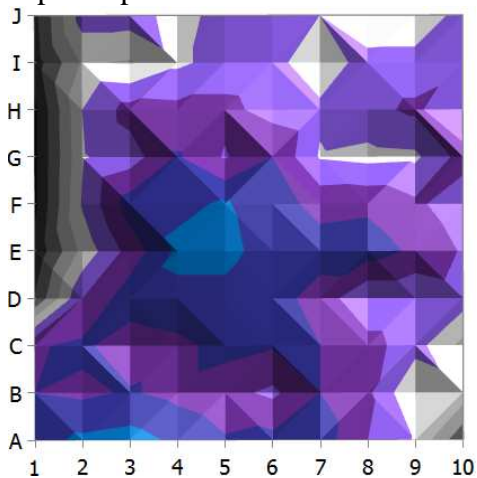
Výrobce GEA, průtok 7,46 l/min

D	1,7	3,5	3,6	2,3
	30,9	31,6	31,5	31,7
C	3,1	1,6	1,9	2,8
	32,4	32,8	32,5	31,1
B	3,1	2,3	2,2	2,7
	33,1	34,6	32,7	32,6
A	1,9	3,3	2,9	1,8
	34,2	33,3	32,2	31,8
m/s	1	2	3	4
°C				

Rychlostní pole:



Teplotní pole:



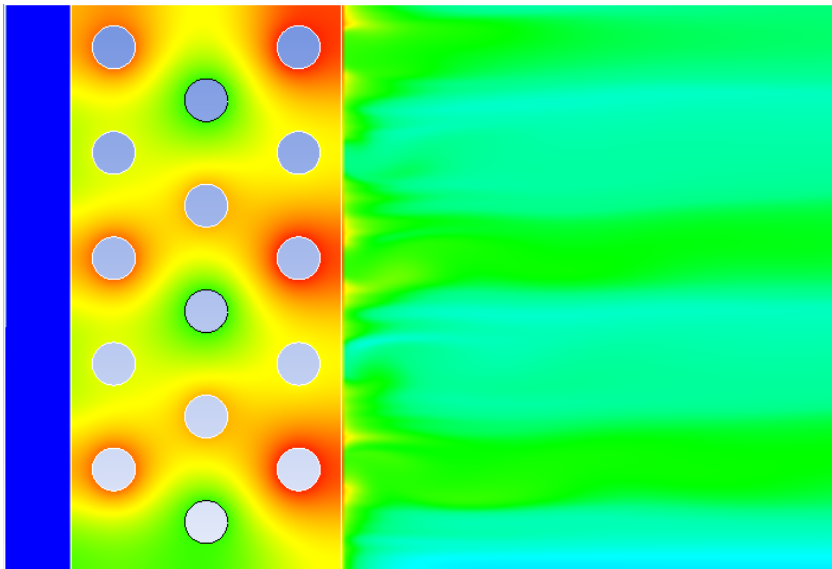
Srovnávací stupnice rychlostí a teplot:

[illegible]

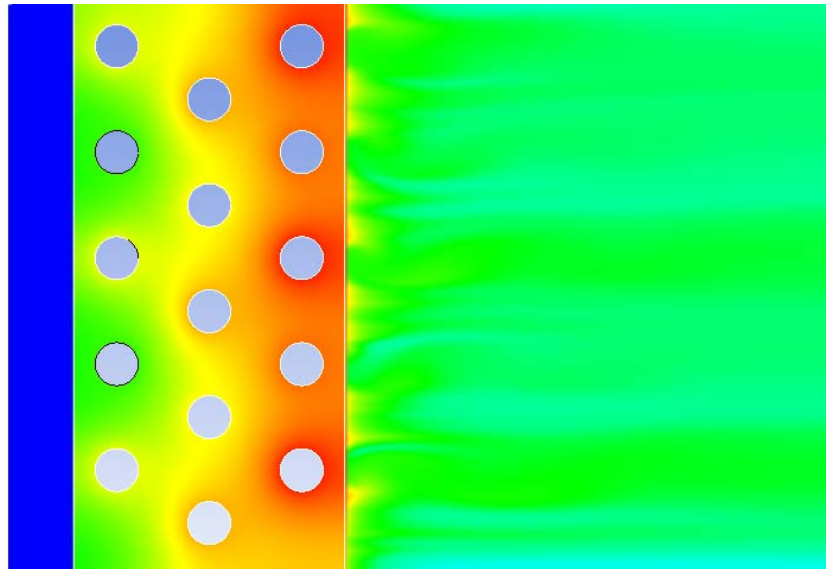
Příloha č. 3

Výsledky numerických simulací - teplotní pole v rovině symetrie lamely

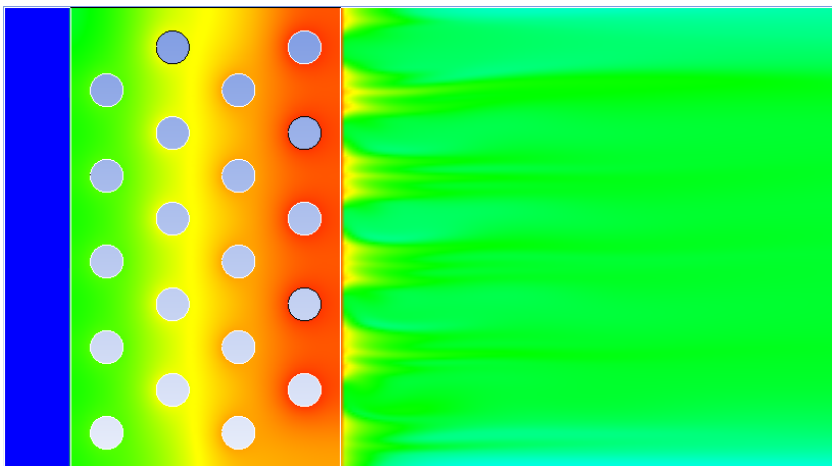
Stávající výměník:



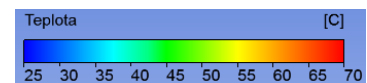
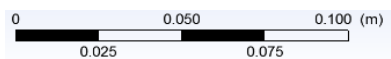
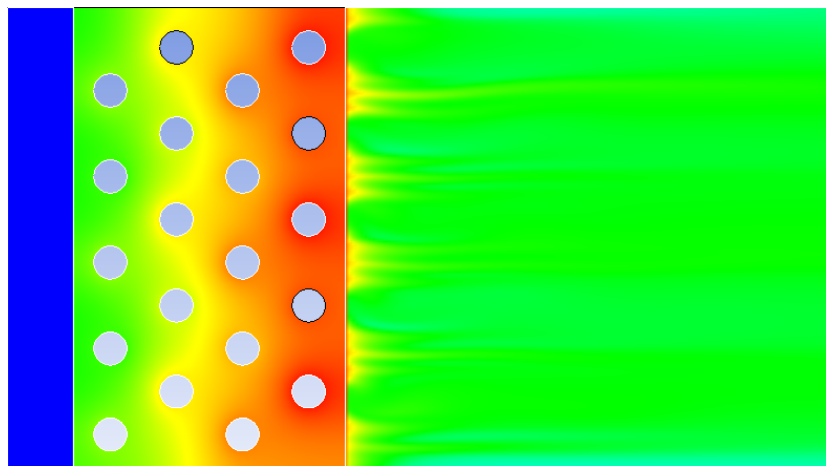
Varianta A:



Varianta B1:



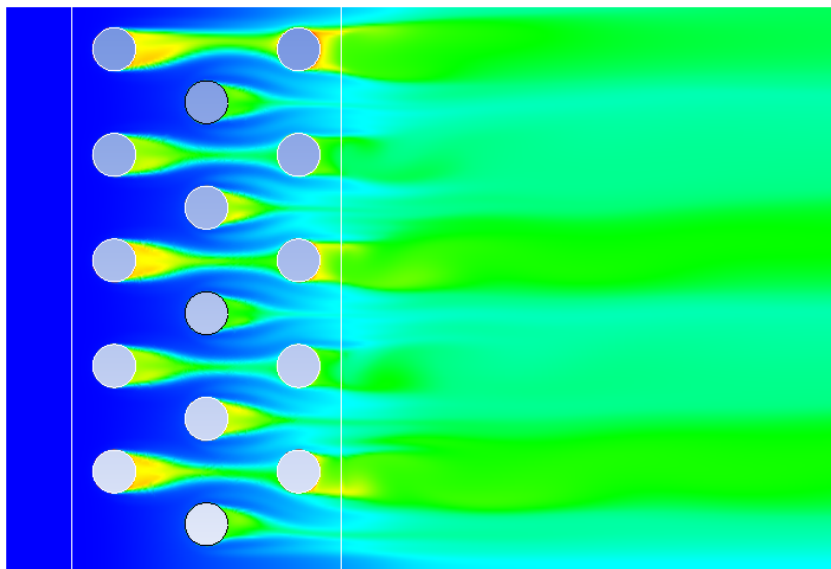
Varianta B2:



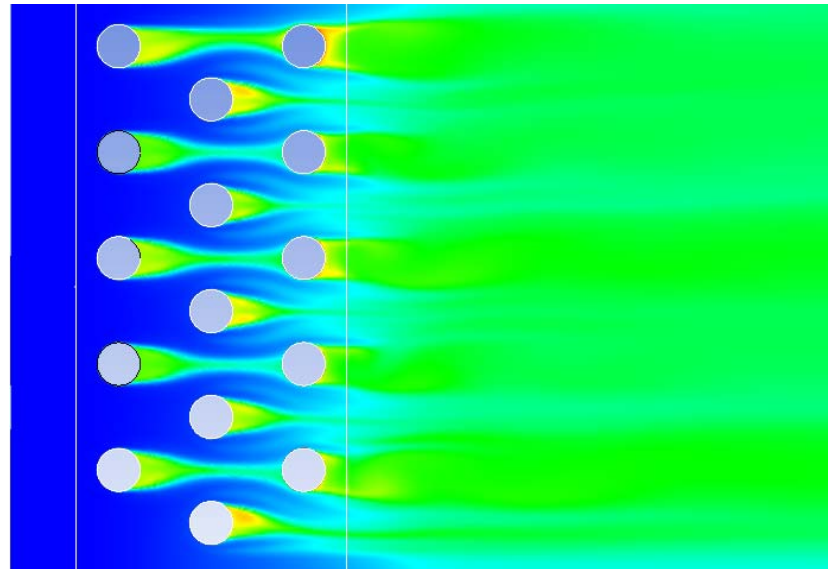
Příloha č. 3

Výsledky numerických simulací - teplotní pole v rovině symetrie vzduchové mezery

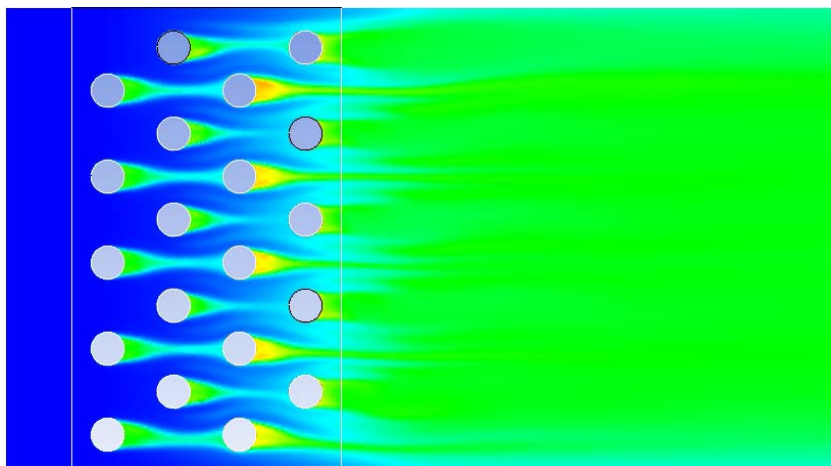
Stávající výměník:



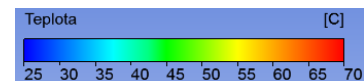
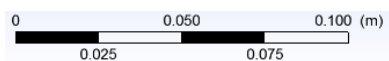
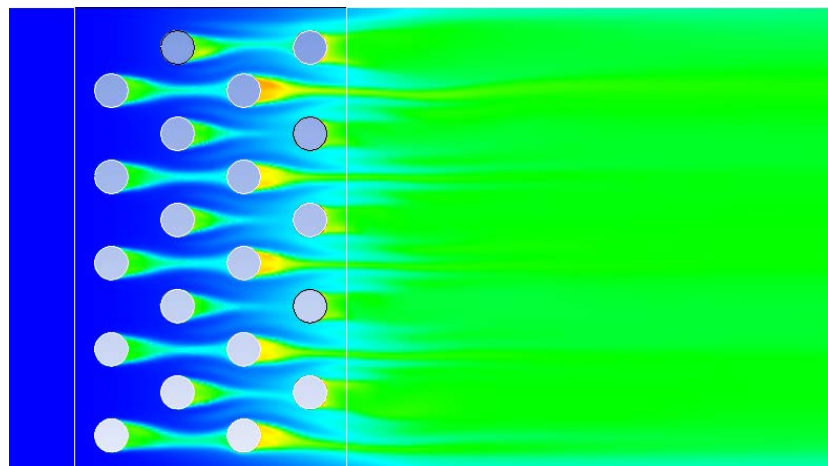
Varianta A:



Varianta B1:



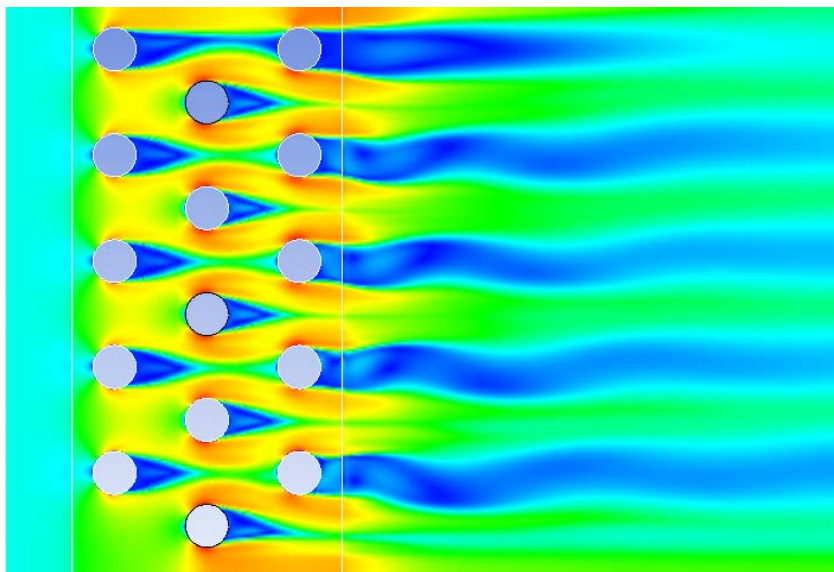
Varianta B2:



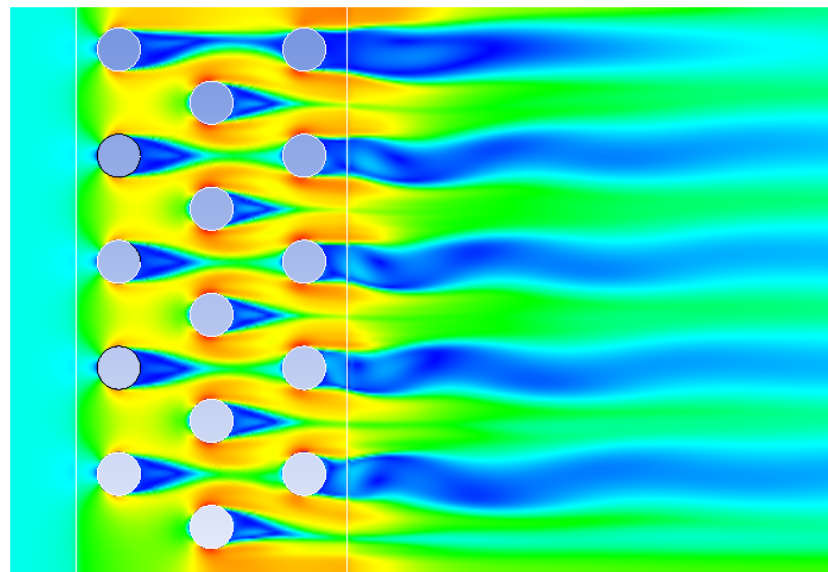
Příloha č. 3

Výsledky numerických simulací - rychlostní pole v rovině symetrie vzduchové mezery

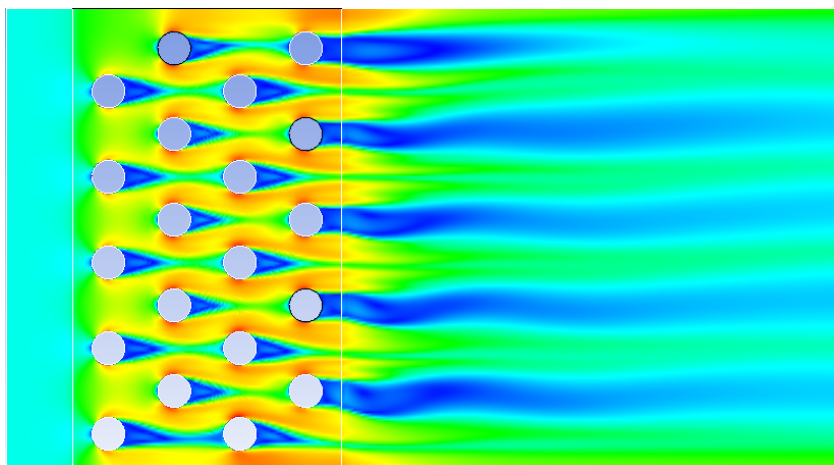
Stávající výměník:



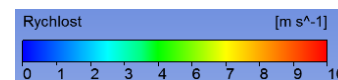
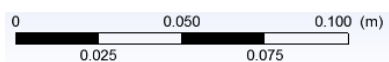
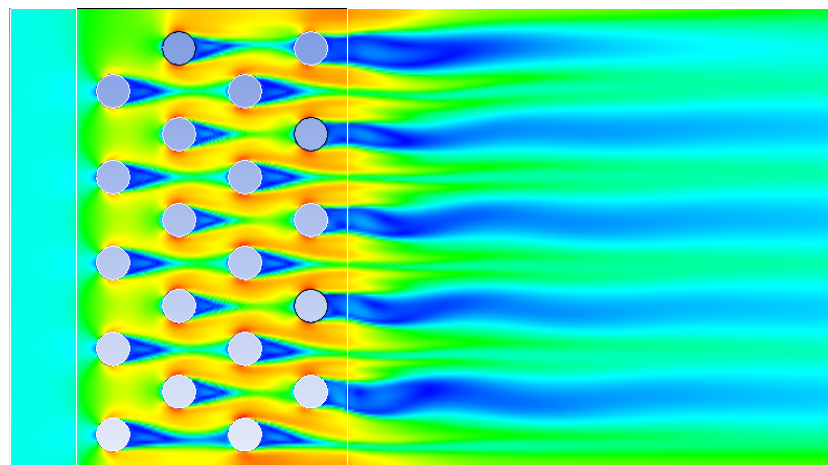
Varianta A:



Varianta B1:



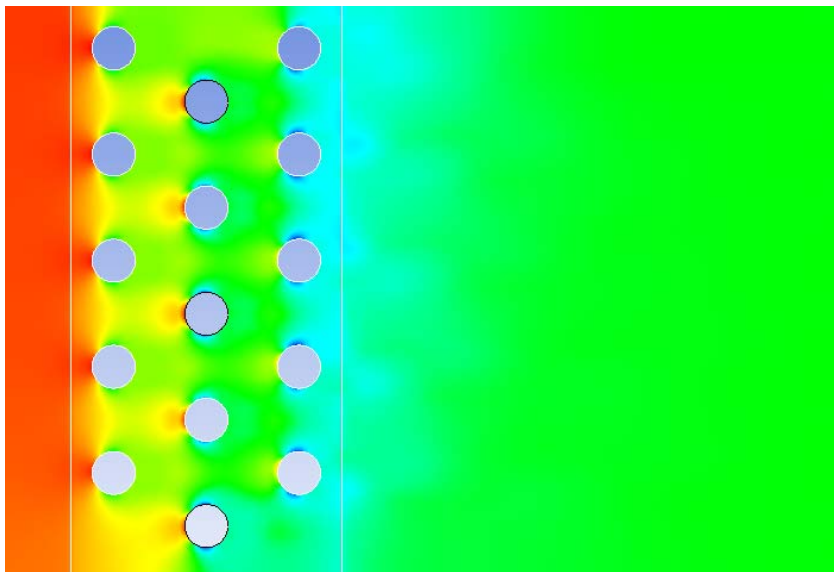
Varianta B2:



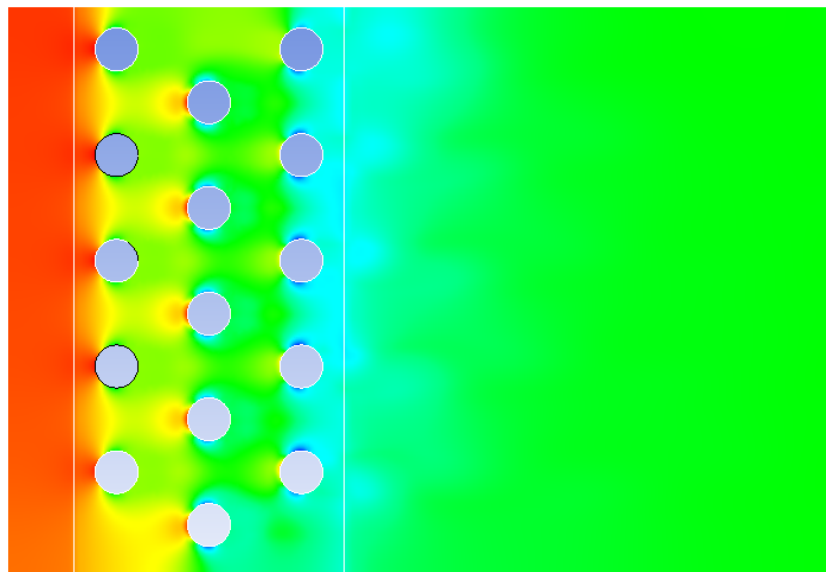
Příloha č. 3

Výsledky numerických simulací - tlakové pole v rovině symetrie vzduchové mezery

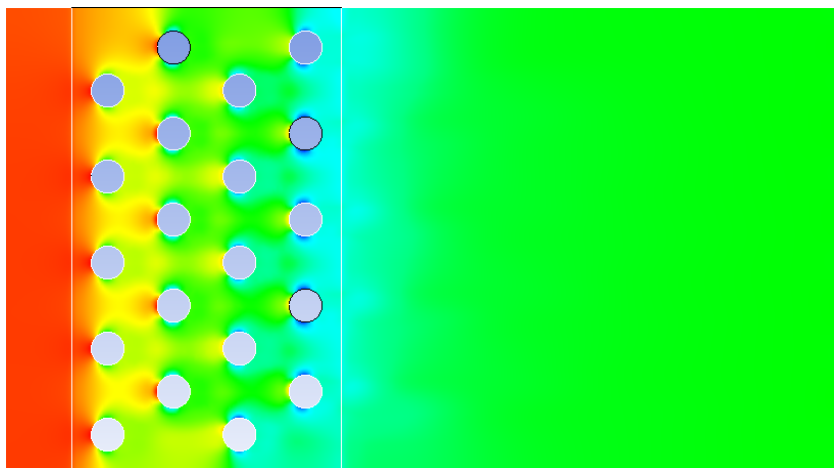
Stávající výměník:



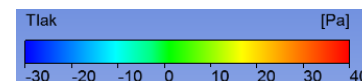
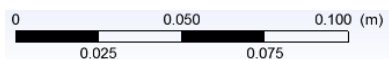
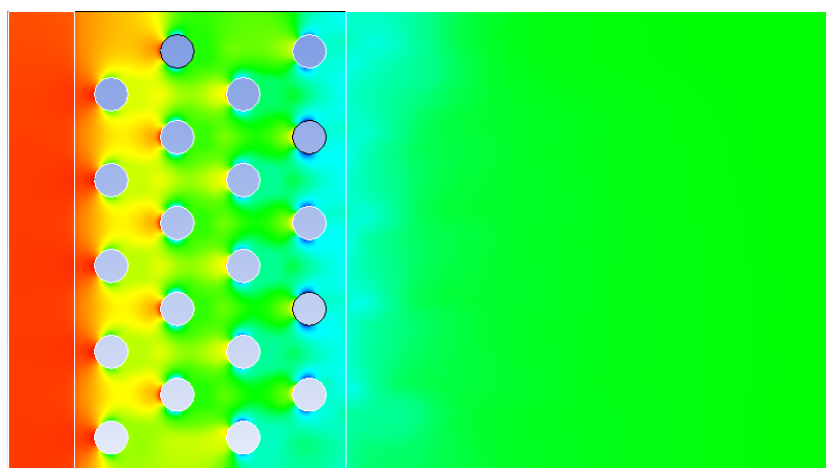
Varianta A:



Varianta B1:



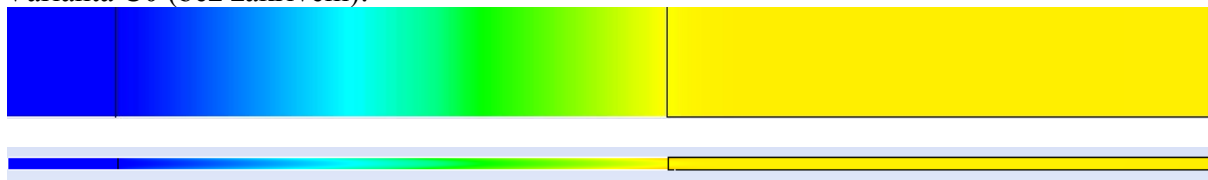
Varianta B2:



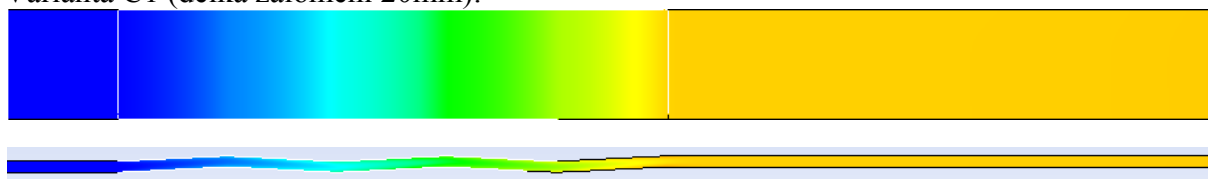
Příloha č. 3

Teplotní pole v rovině symetrie vzduchové mezery a v rovině kolmé k mezeře.

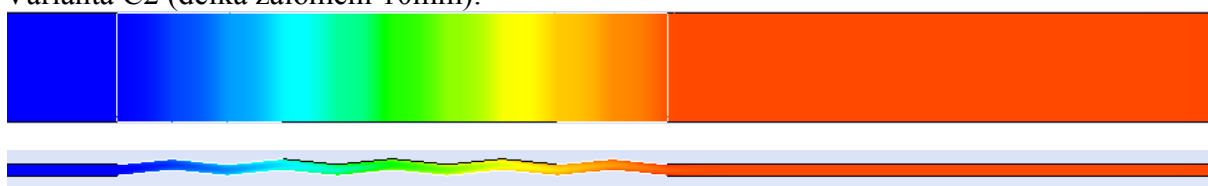
Varianta C0 (bez zakřivení):



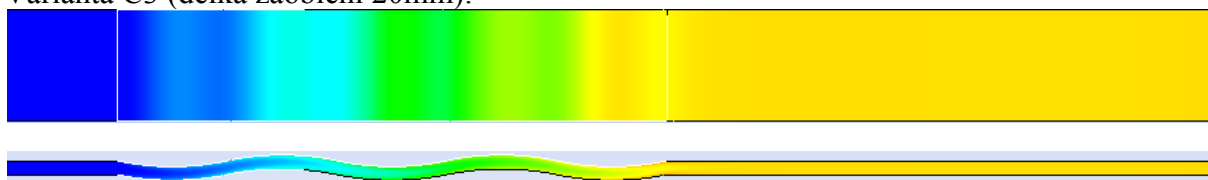
Varianta C1 (délka zalomení 20mm):



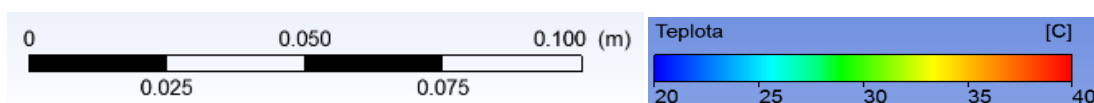
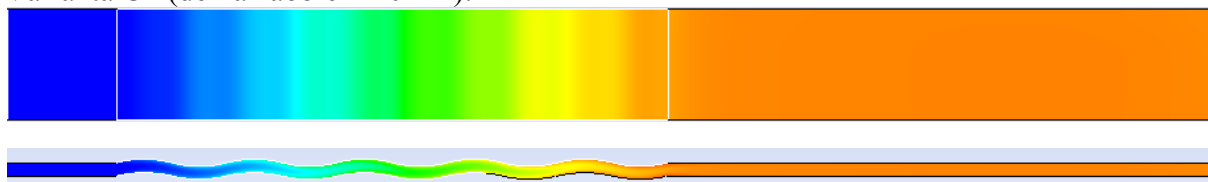
Varianta C2 (délka zalomení 10mm):



Varianta C3 (délka zaoblení 20mm):



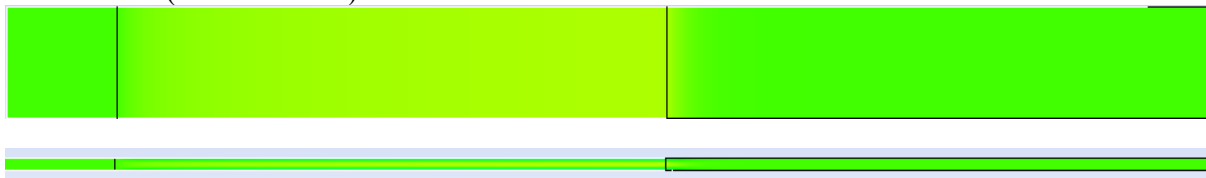
Varianta C4 (délka zaoblení 10mm):



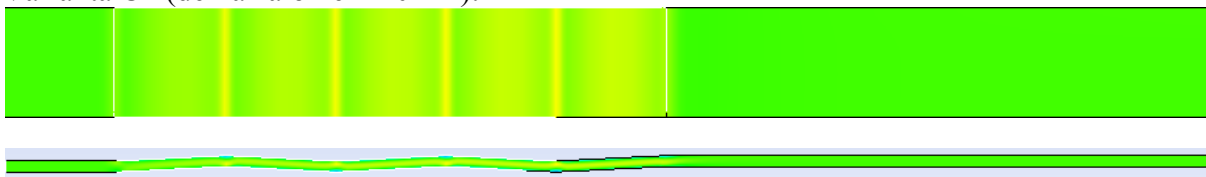
Příloha č. 3

Rychlostní pole v rovině symetrie vzduchové mezery a v rovině kolmé k mezeře.

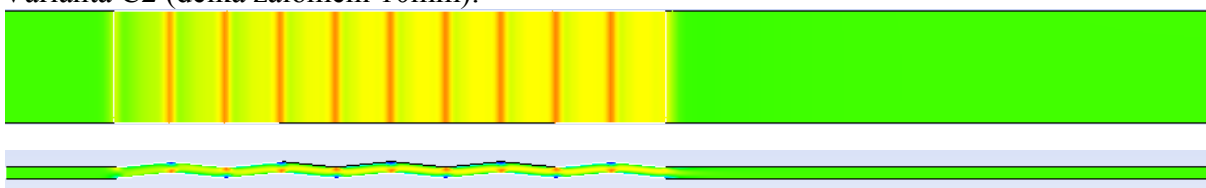
Varianta C0 (bez zakřivení):



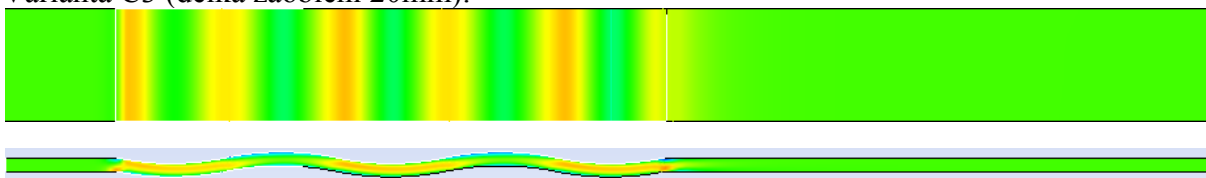
Varianta C1 (délka zalomení 20mm):



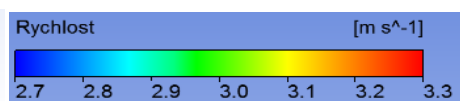
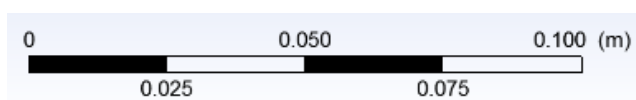
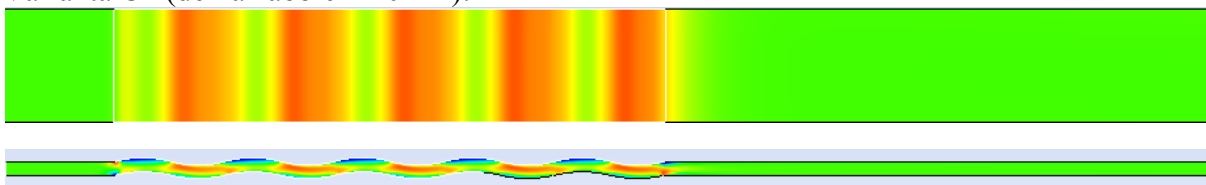
Varianta C2 (délka zalomení 10mm):



Varianta C3 (délka zaoblení 20mm):



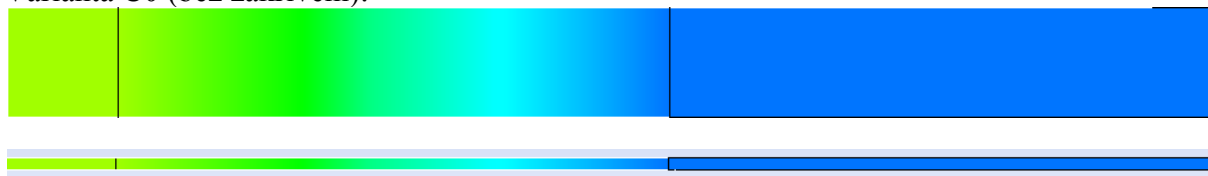
Varianta C4 (délka zaoblení 10mm):



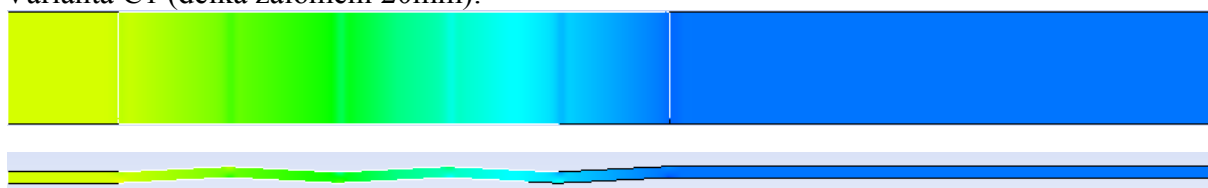
Příloha č. 3

Tlaková pole v rovině symetrie vzduchové mezery a v rovině kolmé k mezeře.

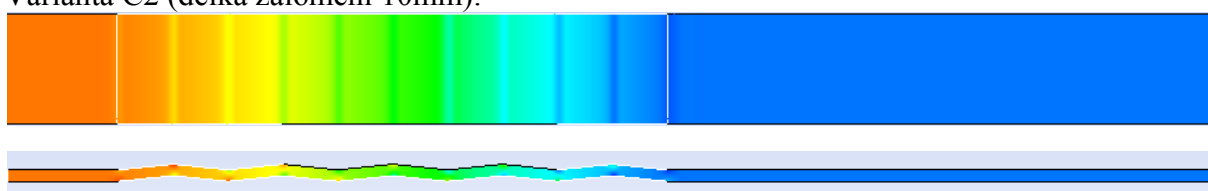
Varianta C0 (bez zakřivení):



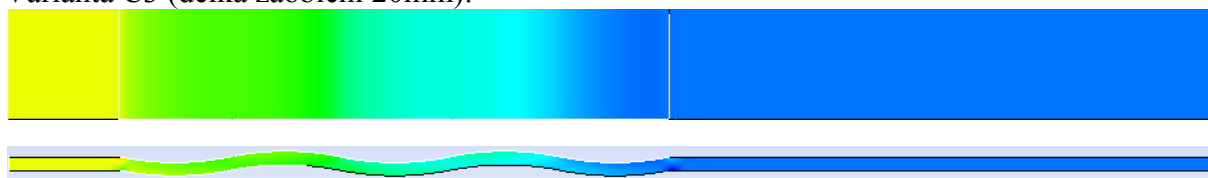
Varianta C1 (délka zalomení 20mm):



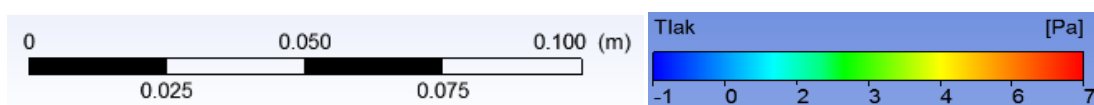
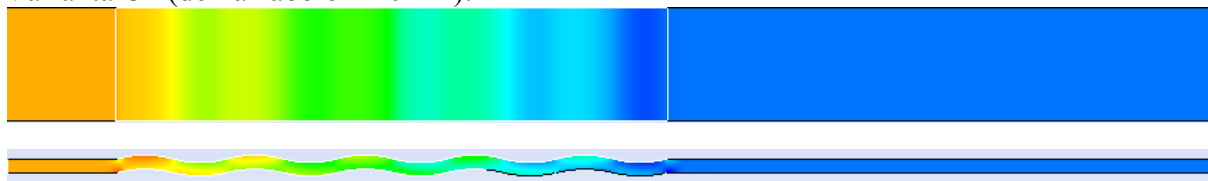
Varianta C2 (délka zalomení 10mm):



Varianta C3 (délka zaoblení 20mm):



Varianta C4 (délka zaoblení 10mm):

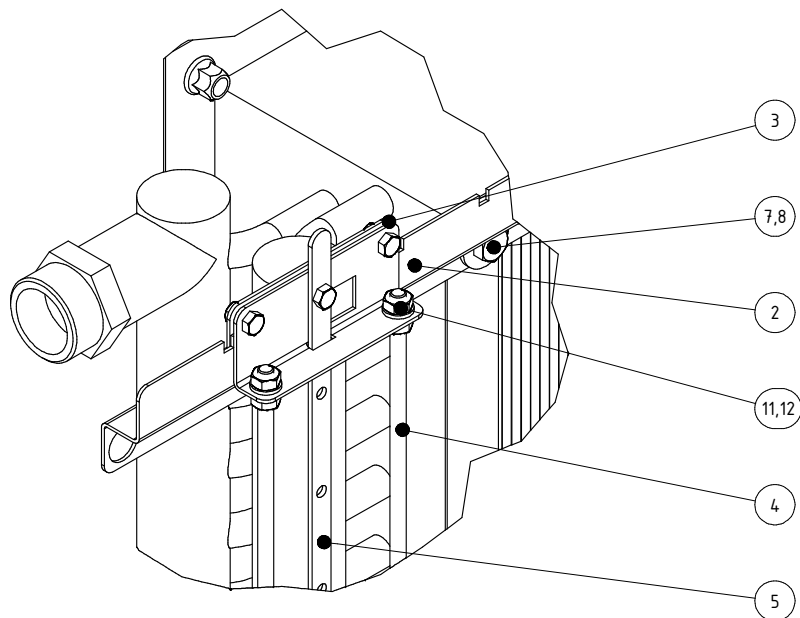


Příloha č.4

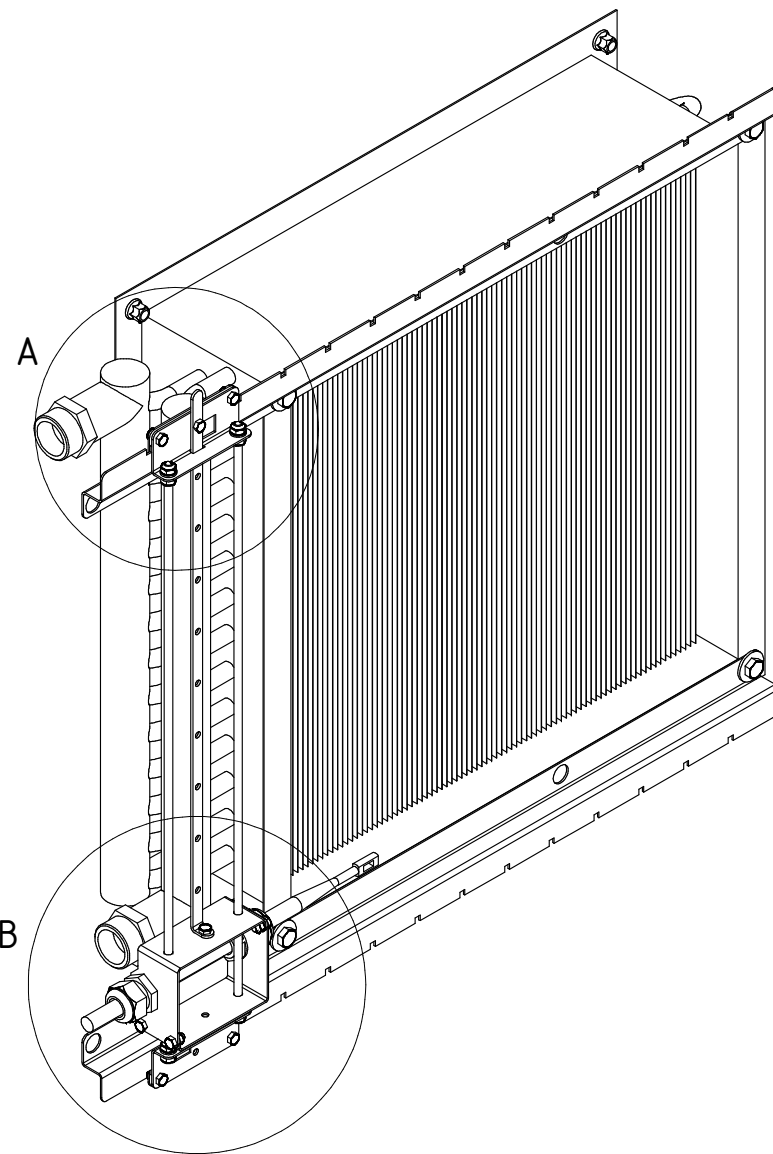
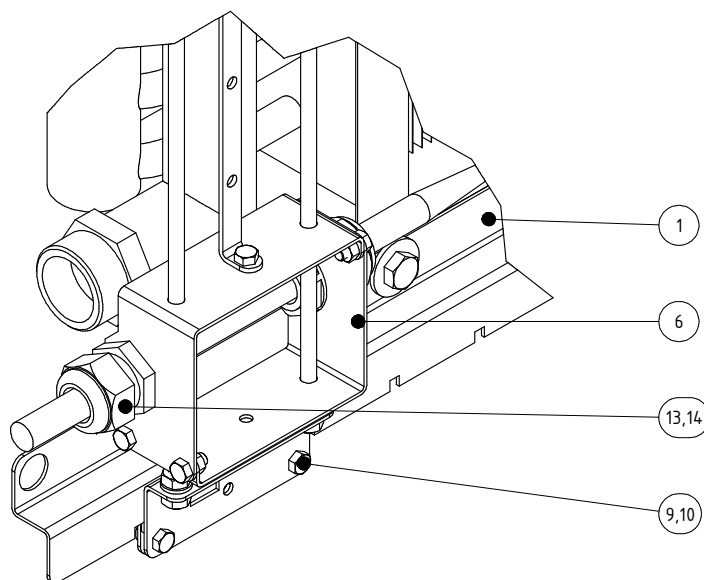
Kusovník a výkresová dokumentace polohovacího zařízení



KUSOVNÍK DP-00		
pozice	název	množství
1	díl DP-01 HORIZONTÁLNÍ VEDENÍ	2ks
2	díl DP-02 DÍL DRŽÁKU VEDENÍ	2ks
3	díl DP-03 VLOŽKA VEDENÍ	2ks
4	díl DP-04 VERTIKÁLNÍ VEDENÍ	2ks
5	díl DP-05 VERTIKÁLNÍ ARETACE	1ks
6	díl DP-06 DÍL DRŽÁKU SONDY	2ks
7	šroub M8x20	4ks
8	plochá podložka 9	4ks
9	šroub M5x12	11ks
10	matice M5	9ks
11	matice M6	8ks
12	plochá podložka 6,4	8ks
13	vývodka M20×1,5	2ks
14	matice k vývodce M20×1,5	2ks

A (1 : 2)

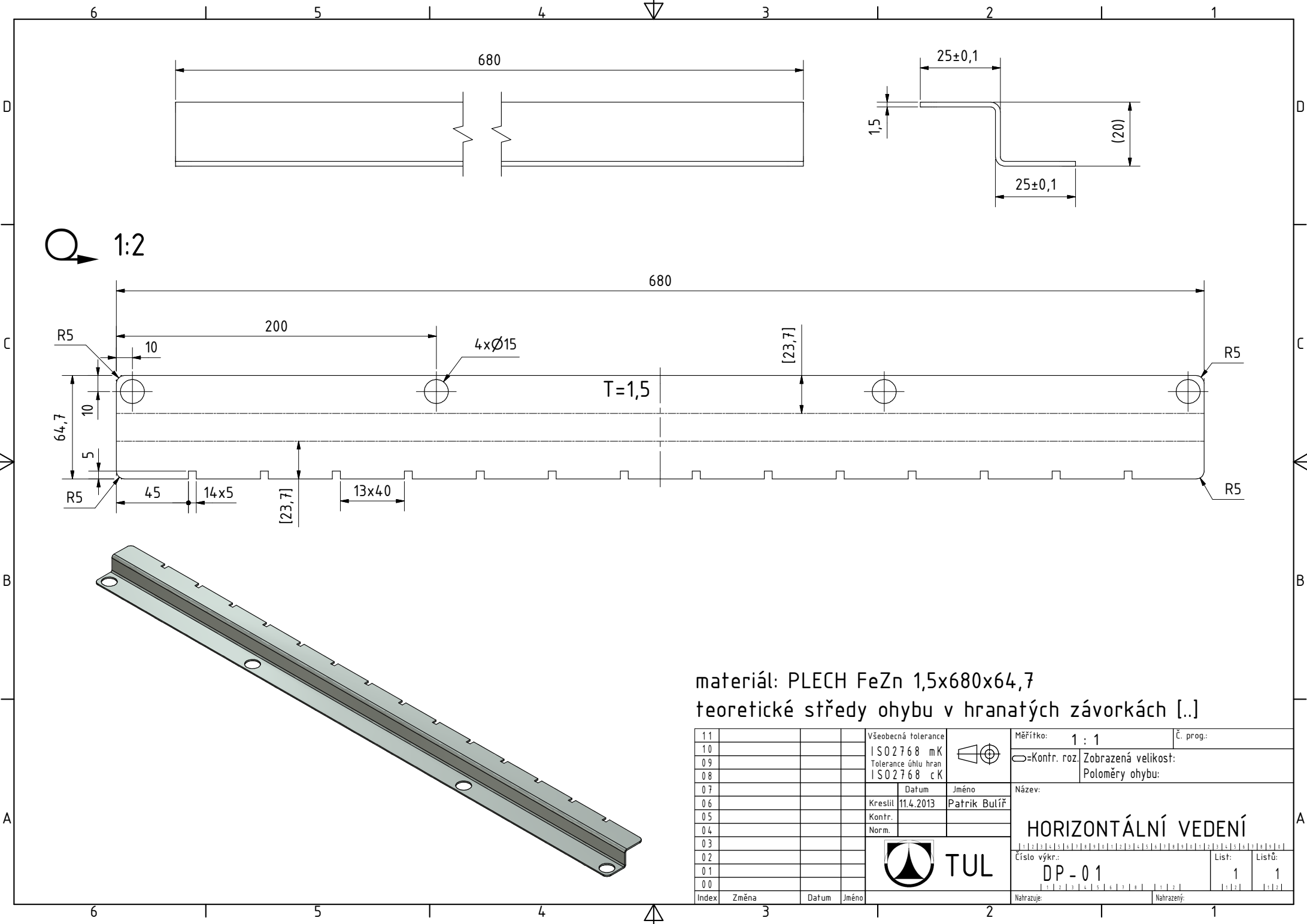


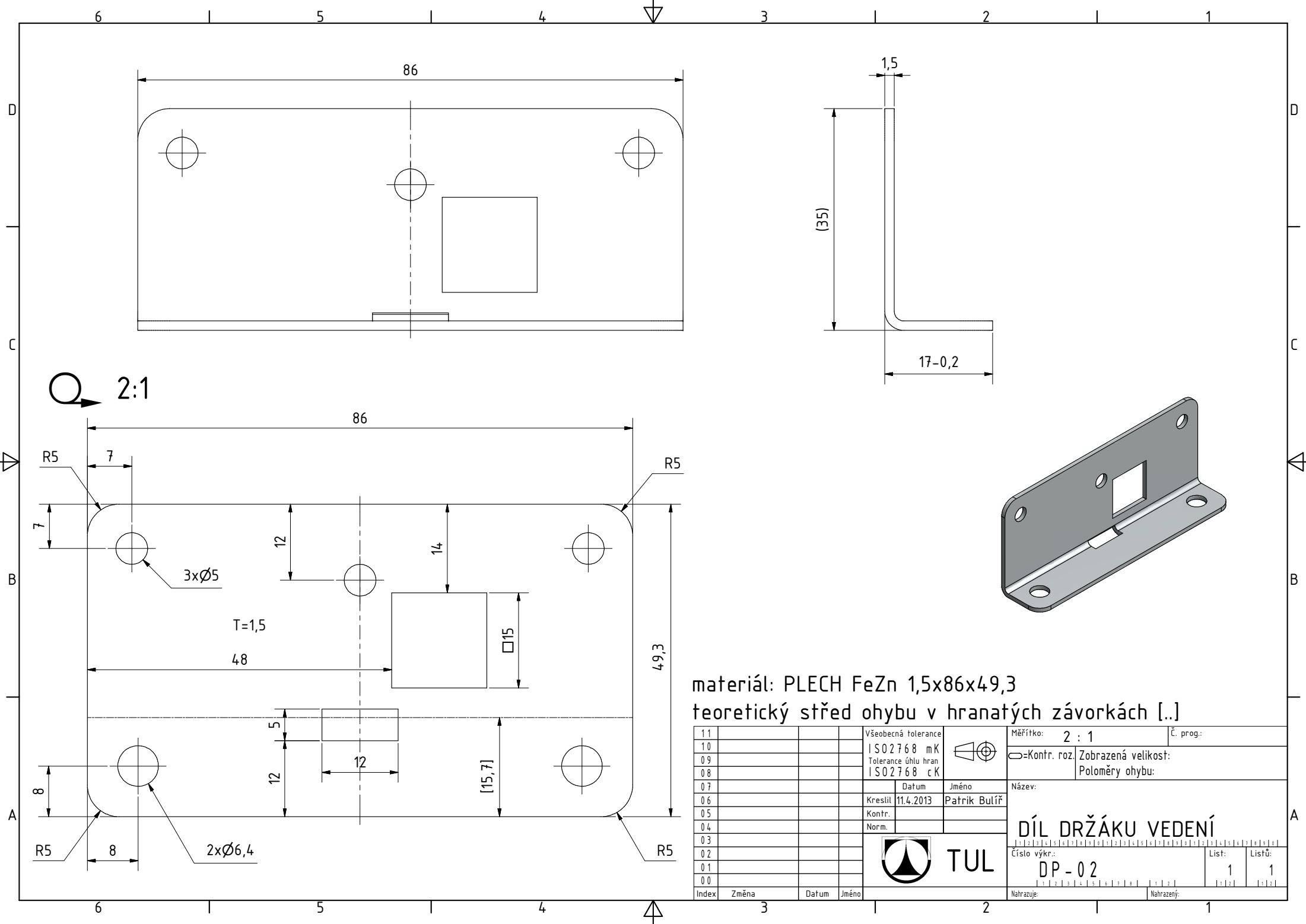
B (1 : 2)



11				Všeobecná tolerance		Měřítko:	Č. prog.:		
10				ISO 2768 mK			O=Kontr. roz.	Zobrazená velikost: Poloměry ohybu:	
09				Tolerance úhlu hran					
08				ISO 2768 cK					
07				Datum	Jméno	Název:			
06				Kreslil	11.4.2013	Patrik Bulíř			
05				Kontr.					
04				Norm.					
03					TUL				
02									
01									
00									
Index	Změna	Datum	Jméno						
						Číslo výkr.: DP - 00		List: 1	Listů: 1
						Nahrazuje:		Nahražený:	

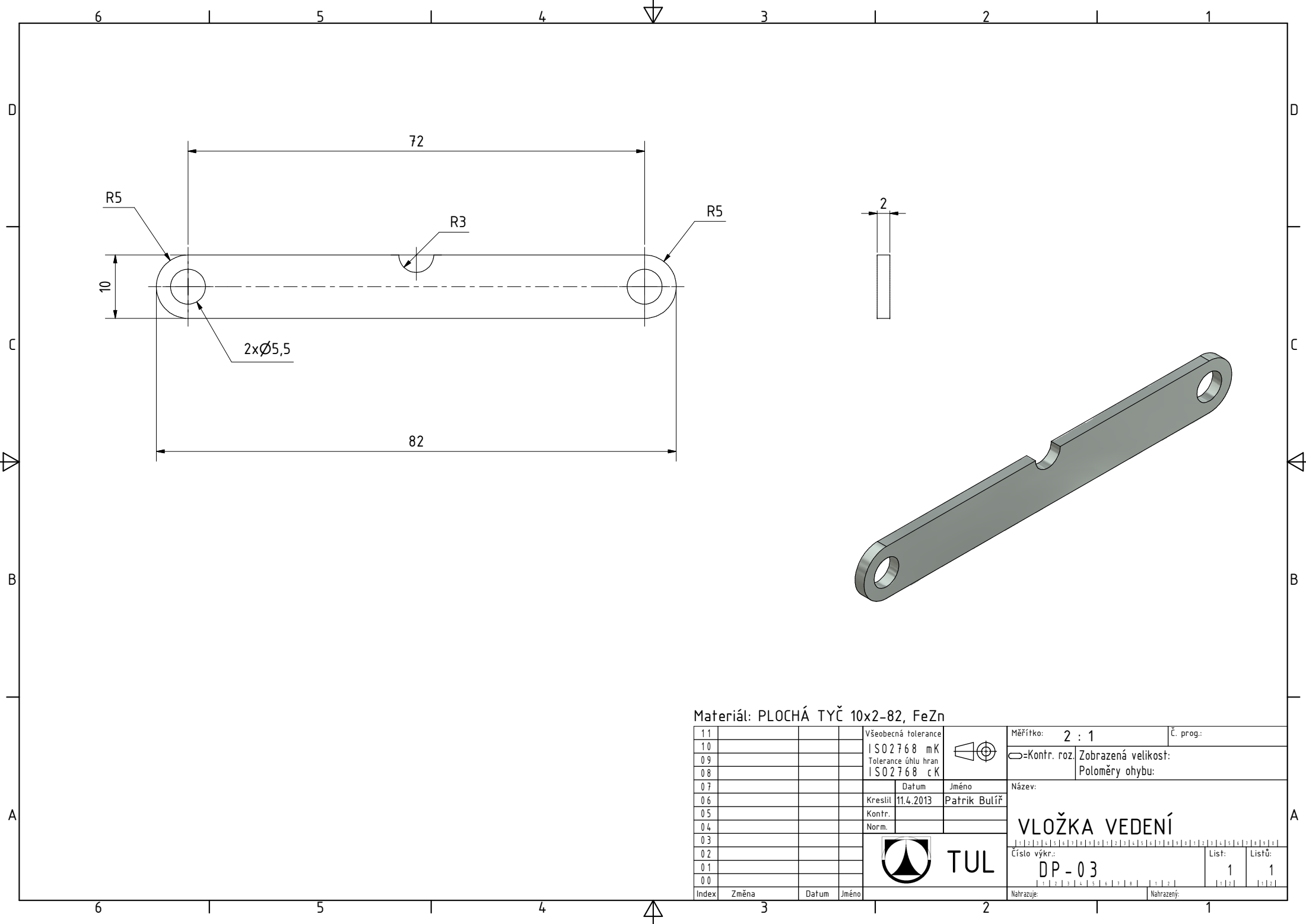


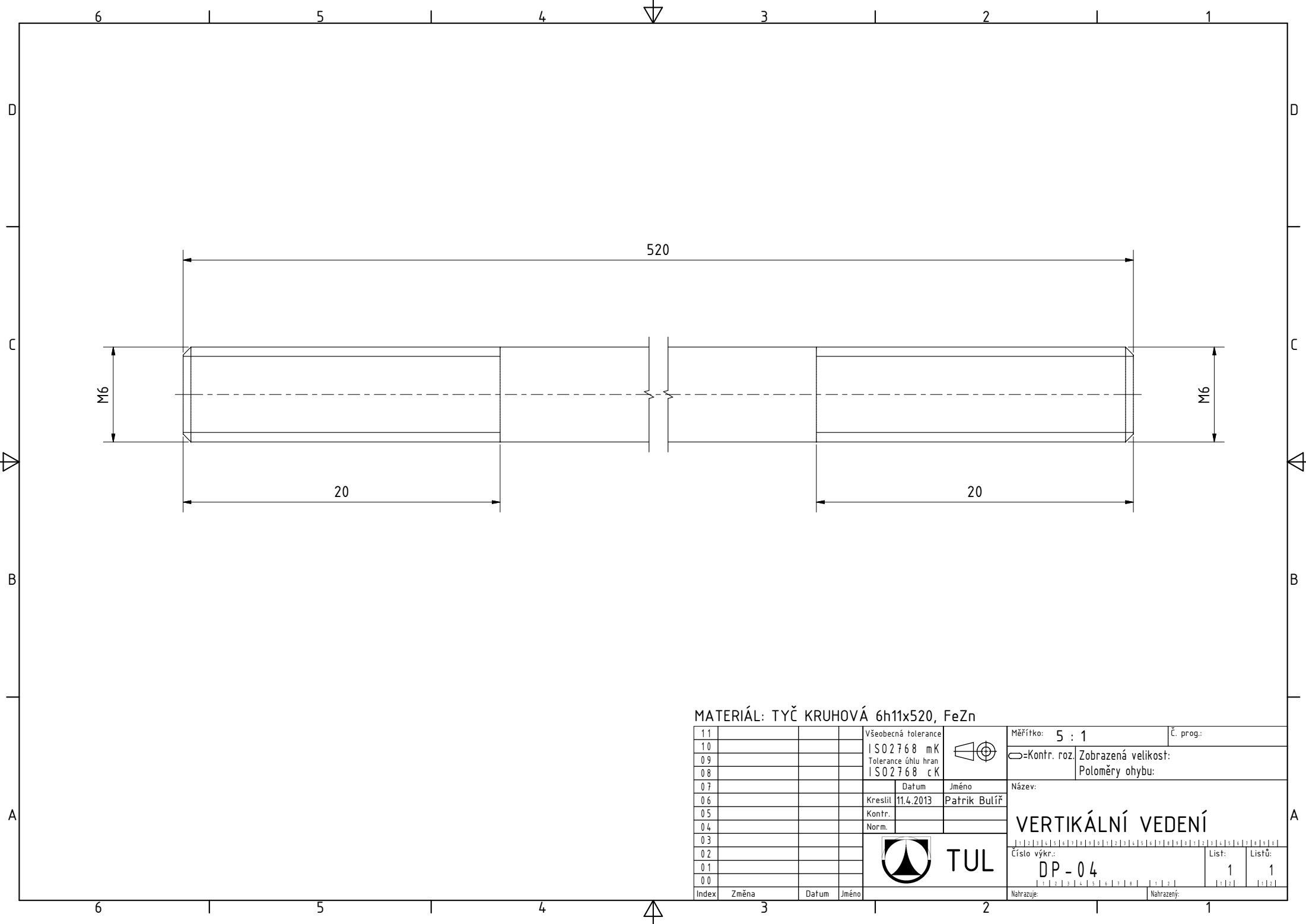






materiál: PLECH FeZn 1,5x86x49,3
teoretický střed ohybu v hranatých závorkách [...]

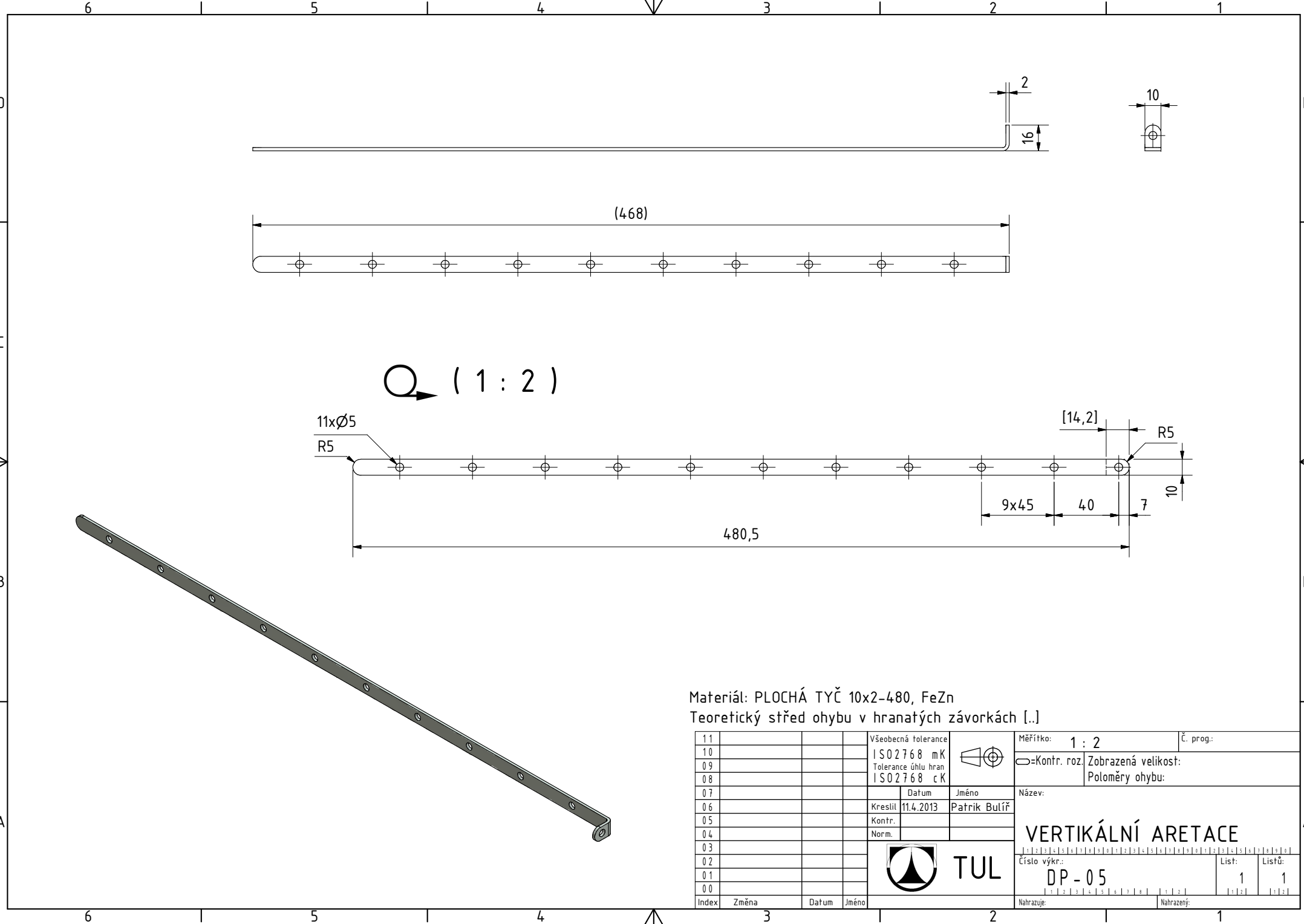
11				Všeobecná tolerance		Měřítko: 2 : 1	Č. prog.:
10				ISO 2768 mK			
09				Tolerance úhlu hran		☐=Kontr. roz.	Zobrazená velikost:
08				ISO 2768 cK			Poloměry ohybu:
07				Datum	Jméno	Název:	
06				Kreslil 11.4.2013	Patrik Bulíř	DÍL DRŽÁKU VEDENÍ	
05				Kontr.			
04				Norm.			
03							
02						Číslo výkr.: DP - 02	List: 1
01							Listů: 1
00							
Index	Změna	Datum	Jméno			Nahrzuje:	Nahrazený:

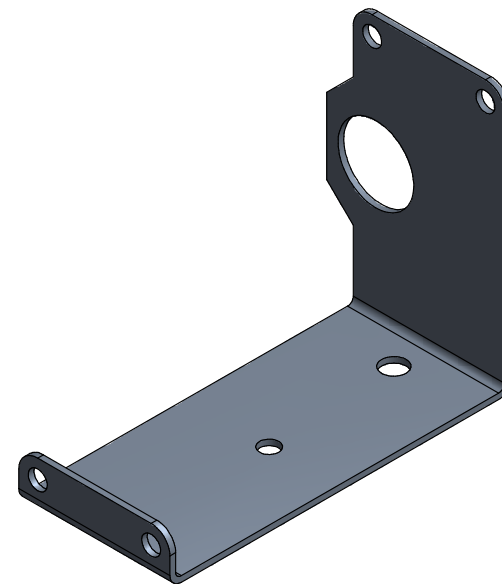
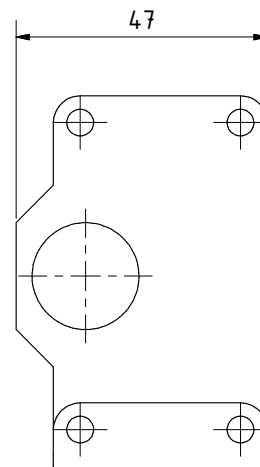
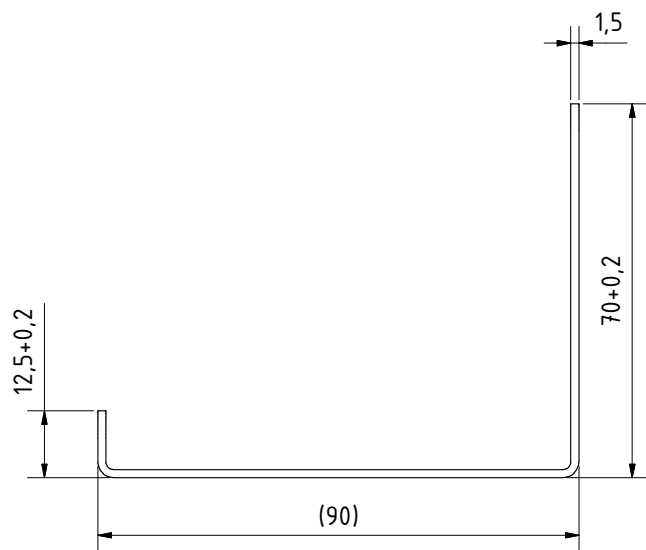




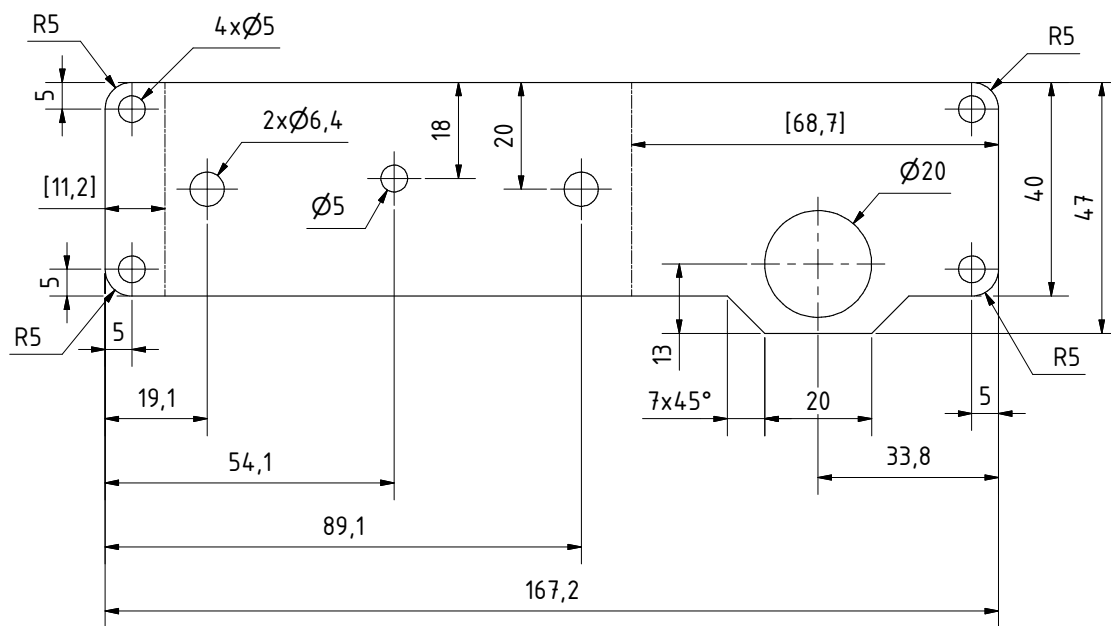
MATERIÁL: TYČ KRUHOVÁ 6h11x520, FeZn

11				Všeobecná tolerance		Měřítka: 5 : 1	Č. prog.:
10				ISO 2768 mK		Kontr. roz. Zobrazená velikost: Poloměry ohybu:	<div>VERTIKÁLNÍ VEDENÍ</div> <div>Číslo výkr.: DP - 04</div> <div>List: 1</div> <div>Listů: 1</div>
09				Tolerance úhlu hran			
08				ISO 2768 cK			
07				Datum	Jméno	Název:	
06				Kreslil 11.4.2013	Patrik Bulíř		
05				Kontr.			
04				Norm.			
03					TUL		
02							
01							
00							
Index	Změna	Datum	Jméno	Nahrazuje:			Nahražený:





Q 1:1



materiál: PLECH FeZn 1,5x167,2x47
teoretické středy ohybu v hranatých závorkách [...]

11				Všeobecná tolerance	Měřítka: 1 : 1	Č. prog.:
10				ISO 2768 mK	Kontr. roz.	Zobrazená velikost:
09				Tolerance úhlu hran		Poloměry ohybu:
08				ISO 2768 cK	Název:	
07				Datum	Jméno	
06				Kreslil 11.4.2013	Patrik Bulíř	
05				Kontr.		
04				Norm.		
03						
02						
01						
00						
Index	Změna	Datum	Jméno			

DÍL DRŽÁKU SONDY

Číslo výkř.: DP-06

List: 1 Listů: 1

Nahrzuje: Nahrzený: